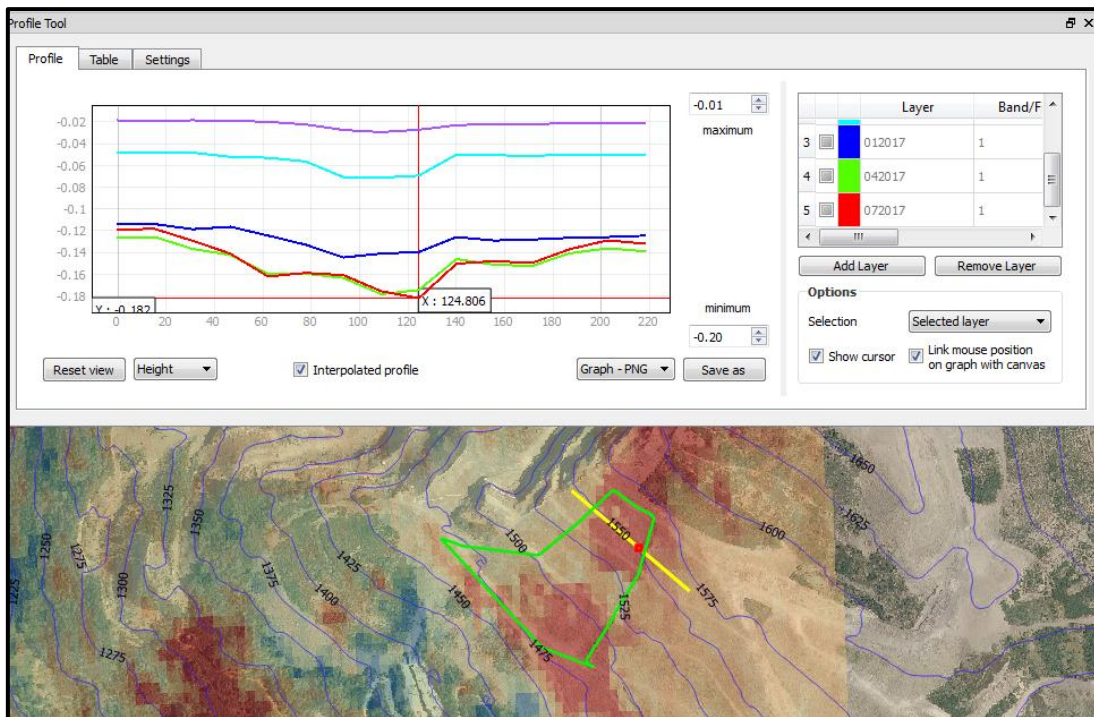




TRABAJO FIN DE MÁSTER

Seguimiento y control cuantitativo del desplazamiento del terreno en una zona de la explotación minera, “El Feixolín” (León), mediante Interferometría Diferencial SAR.



ALUMNO: LUIS GONZÁLEZ CALVO

TUTOR: BENJAMÍN ARIAS PÉREZ

SEPTIEMBRE, 2018

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Seguimiento y control cuantitativo del desplazamiento del terreno en una zona de la explotación minera, “El Feixolín” (León), mediante Interferometría Diferencial SAR.

ALUMNO: LUIS GONZÁLEZ CALVO

TUTOR: BENJAMÍN ARIAS PÉREZ

SEPTIEMBRE, 2018

CONTENIDO DEL TRABAJO

1.	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Objetivos.....	4
1.3.	Estructura del trabajo.....	4
2.	CONCEPTOS TEÓRICOS.....	7
2.1.	Conceptos Teóricos	7
2.1.1.	Sistemas RADAR.....	7
2.1.2.	Radar de Apertura Sintética SAR	11
2.1.3.	Sistema SAR Sentinel 1	19
2.2.	Metodología del proceso	30
2.2.1.	Flujo de trabajo.....	30
2.2.2.	Características de la imagen SAR.....	32
2.2.3.	Interferometría con imágenes SAR.....	33
2.2.4.	Flujo de proceso para la obtención del desplazamiento del terreno	34
3.	DESARROLLO DEL PROCESO	45
3.1.	Selección y obtención de datos.....	45
3.1.1.	Selección de imágenes.....	45
3.1.2.	Descarga de datos.....	45
3.2.	Proceso con software SNAP	48
3.2.1.	Procesamiento de las imágenes	48
3.3.	Proceso con software SNAPHU	66
4.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	72
4.1.	Desplazamiento medido mediante técnica DinSAR.....	72
4.2.	Desplazamiento medido con GPS	78
4.3.	Comparación de resultados.....	80

5.	ESTUDIO DE COSTES	82
5.1.	Coste del seguimiento con medidas GPS	82
5.2.	Coste del seguimiento con técnica DinSAR	83
6.	CONCLUSIONES	84
6.1.	Conclusiones.....	84
6.2.	Nuevas líneas de investigación y mejoras	86
7.	BIBLIOGRAFÍA	88



1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

1.1. Introducción

Tras los estudios del Máster en Geotecnologías Cartográficas en la Ingeniería y la Arquitectura, se afronta la realización del trabajo “Seguimiento y control cuantitativo del desplazamiento del terreno en una zona de la explotación minera, “El Feixolín” (León), mediante Interferometría Diferencial SAR” como Trabajo Fin de Máster para la finalización de los citados estudios.

Con los grandes avances experimentados por la ciencia en capacidad de proceso de los ordenadores y en el desarrollo y miniaturización de dispositivos, ahora se encuentran al alcance de gran número de usuarios, dispositivos de captura de datos y técnicas de tratamiento de datos en las ciencias del estudio de la tierra, como en otras muchas ciencias, que antes únicamente eran utilizados por departamentos gubernamentales y empresas especializadas.

En los estudios del Máster se consigue conocer la base de los fundamentos teóricos, el funcionamiento y aplicaciones de muchos de éstos dispositivos y técnicas de tratamiento de datos suministrados por los instrumentos de medida y captura de datos en las ciencias del estudio de la tierra, lo cual posibilita dos vías de aprovechamiento de los conocimientos adquiridos, una vía de investigación con la realización de un doctorado o la aplicación de los conocimientos adquiridos al desarrollo profesional, con la ventaja de conocer las bases teóricas y no solamente la aplicación práctica de las técnicas y dispositivos.

En el presente trabajo se toman como base las técnicas practicadas en la asignatura de Láser y Radar, correspondientes al aprovechamiento de los datos capturados por satélites provistos con un dispositivo de Radar de Apertura Sintética, Synthetic Aperture Radar (SAR), y mediante la técnica de Interferometría Diferencial SAR (DinSAR) se van a obtener los desplazamientos sufridos en la zona de estudio a lo largo del tiempo. Los



desplazamientos obtenidos mediante esta técnica se van a comparar con los datos obtenidos mediante mediciones con observaciones GPS.

La Comisión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea, European Space Agency (ESA), tienen en marcha el programa Copérnico, un ambicioso programa espacial para la observación de la tierra, diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana, según se describe en la página Web de la ESA, y es la responsable de coordinar la distribución de los datos recogidos por más de 30 satélites.

Los datos de radar SAR a utilizar son recolectados por los satélites Sentinel 1A y Sentinel 1B, que forman parte del programa Copérnico, y puestos a disposición de los usuarios por la ESA, la ESA pone también a disposición de los usuarios diversos programas de software para el tratamiento de los datos procedentes de las observaciones con RADAR SAR desde los satélites.

La zona de estudio está situada en el norte de la provincia de León, en la restauración de la mina de carbón, ya inactiva, de interior y a cielo abierto el Feixolín, y lo que se pretende es cuantificar la subsidencia aparecida en la zona.

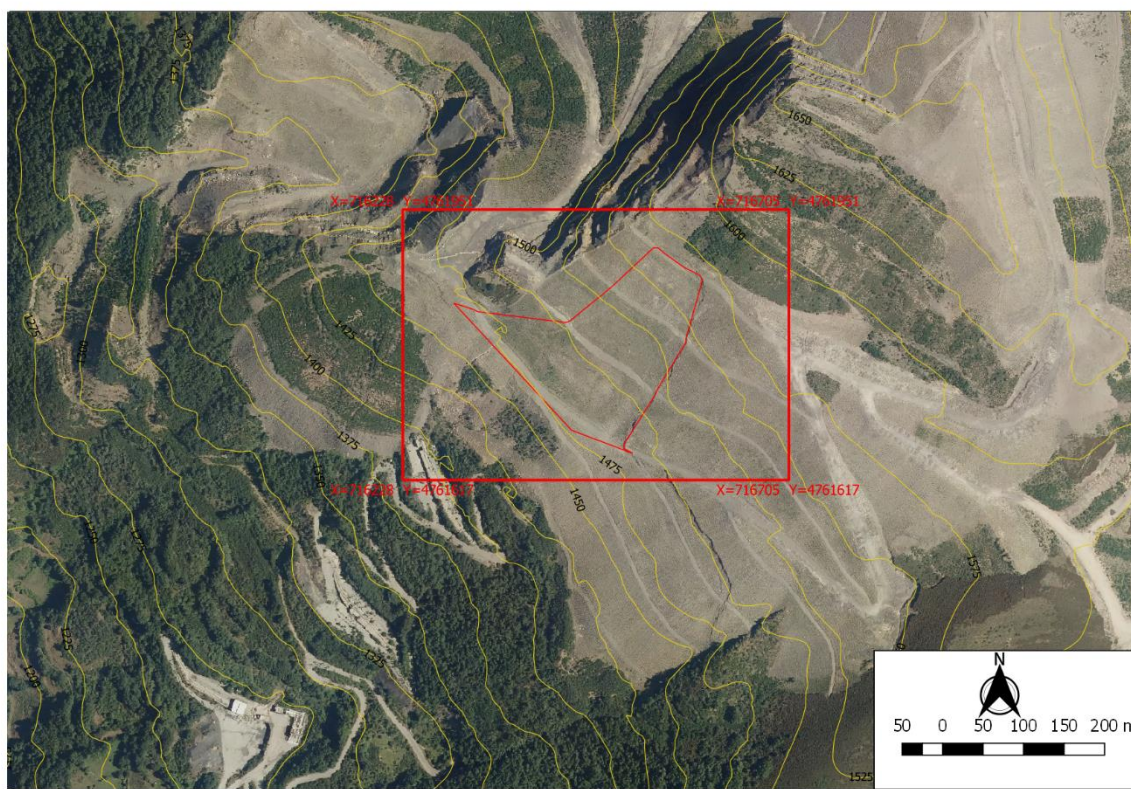


Figura 1: Localización de la zona de estudio

Noticia en el Diario de León el día 24 de Octubre 2017.

El IGME elabora un informe para la Junta sobre la situación del Feixolín

“Este pasado verano, el Instituto Geominero consideró conveniente la elaboración de un estudio en detalle, monitorizando el movimiento para determinar las soluciones adecuadas para la zona y a día de hoy continúan con esta misma posición, de este modo podrían determinar las soluciones más adecuadas para la zona. Durante las primeras jornadas de geología que se celebraron el pasado verano en el municipio de Villablino a través del Aula Geológica de Robles, el IGME detectó continuos movimientos en la ladera Oeste del Feixolín, debido a que Orallo se ubica en un valle glaciar y la actividad minera y su posterior restauración, con la colocación de una escombrera en la parte superior, lo que aumenta el peso que aguanta la ladera. Además, comprobaron que la antigua carretera antigua que llevaba a las diferentes bocaminas de los distintos pisos está totalmente inestable, lo que hace suponer que el movimiento va desde la parte superior hasta la parte inferior.”



1.2. Objetivos

En el presente trabajo se fijan los siguientes objetivos:

- Aplicación de la técnica de Interferometría Diferencial SAR en la comprobación de la deformación del terreno en la zona de estudio.
- Familiarizarse con la estructura y adquisición de datos SAR, puestos a disposición de los usuarios y profesionales por la ESA.
- Familiarizarse con el software libre SNAP y SNAPHU, para el tratamiento de datos SAR.
- Establecimiento de la metodología para el procesado de datos y obtención de los productos necesarios para cuantificar el desplazamiento sufrido por el terreno en la zona de estudio.
- Valor cuantitativo del desplazamiento obtenido con datos de RADAR SAR, mediante Interferometría Diferencial SAR.
- Valor cuantitativo del desplazamiento obtenido con datos medidos con GPS diferencial RTK con correcciones recibidas por Internet.
- Estimación de costes para el seguimiento del desplazamiento con mediciones GPS y con mediciones mediante Interferometría Diferencial SAR.

1.3. Estructura del trabajo

El desarrollo del presente trabajo se estructura en los siguientes apartados:

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO. En éste apartado se relata la motivación para la realización del presente trabajo, y los objetivos que se pretenden lograr con el desarrollo del mismo.

CONCEPTOS TEÓRICOS. Se realiza una exposición de los principios y fundamentos teóricos de la tecnología de teledetección desde satélite equipado con Radar de Apertura Sintética SAR, ya que vamos a utilizar los datos adquiridos por estos sistemas, así como una descripción y la influencia de los diversos factores y variables que



intervienen en los diversos procesos que se realizan, desde la adquisición de las imágenes SAR a los diversos procesados de las mismas, para obtener la deformación producida en el terreno en la zona de estudio.

Se describen también las diversas técnicas existentes en la actualidad para monitorizar las deformaciones del terreno mediante el procesado de imágenes SAR.

También se expone la metodología que se va a seguir en el desarrollo del trabajo, relacionando y justificando los pasos a realizar en cada apartado del trabajo y los procesos realizados con los diversos programas de software utilizados.

DESARROLLO DEL PROCESO. En este apartado se realiza la descripción detallada, de todos los procesos seguidos para la consecución de los datos que nos permitan alcanzar los objetivos fijados con la realización del trabajo. Los puntos a desarrollar en este apartado son:

- Zona de estudio. Se describe la localización de la zona de estudio, así como la orografía que va a influir y condicionar la selección de las imágenes para realizar el tratamiento.
- Selección y obtención de datos. Se relacionan los criterios para seleccionar las imágenes y se detalla el procedimiento para la descarga de las imágenes.
- Proceso con software SNAP. Descripción del programa utilizado y el proceso detallado del procesamiento de las imágenes para obtener el desplazamiento sufrido por el terreno.
- Proceso con software SNAPHU. Descripción de la ejecución del algoritmo para el desenvolvimiento de la fase presente en el interferograma.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS. Se presentan los datos del desplazamiento obtenidos con la aplicación de la técnica DinSAR y los datos disponibles con la medición GPS.

ESTUDIO DE COSTES. Estimación de costes para la obtención de las medidas del desplazamiento mediante el procesamiento de las imágenes SAR y la medición con sistema GPS con corrección diferencial RTK por Internet.



CONCLUSIONES. Conclusiones obtenidas con el desarrollo del presente trabajo en referencia a la aplicación de la técnica DinSAR, para la medición de las deformaciones del terreno y posibles líneas de investigación o aplicación.



2. CONCEPTOS TEÓRICOS

En este apartado se describen los conceptos teóricos de las tecnologías y factores que intervienen en la utilización de la técnica DinSAR.

Se hace una exposición de las características físicas, geométricas y de procesamiento de estas tecnologías y factores, desde la adquisición de la imagen hasta la obtención del producto final deseado, y su influencia en la calidad de los productos a obtener.

2.1. Conceptos Teóricos

2.1.1. Sistemas RADAR

Como sabemos la Teledetección es la técnica con la que se obtienen datos de un objeto o superficie sin estar en contacto directo con el elemento observado.

El RADAR (Radio Detection and Ranging) es un sistema de teledetección activo, ya que es el sistema quien genera la señal que detecta, esta señal se almacena en el sistema para, mediante el tratamiento adecuado, obtener la información buscada.

Al ser un sistema activo es decir que genera la energía que emite y recibe, y que trabaja con ondas de energía electromagnética, el sistema RADAR tiene las siguientes ventajas en teledetección:

- Puede funcionar con cualquier condición meteorológica.
- Funciona continuamente de día y noche.
- Con las ondas recibidas, que están condicionadas por la dispersión según las características del objetivo observado, se pueden deducir características físicas del terreno.
- Algunas características como el hielo, las olas en la superficie del mar, humedad del suelo y la cantidad de vegetación existente se identifican mejor en las imágenes de radar que en otros sistemas de teledetección.

El RADAR en teledetección se monta sobre una aeronave o sobre un satélite espacial, y al contrario que otros sistemas como la fotogrametría o el escáner laser y LIDAR, efectúa las mediciones con orientación lateral, como se muestra en la figura 2, la línea más cercana al sensor es la medida de rango cercano y la más alejada es la medida de

rango lejano. En un sistema SAR estos ángulos pueden ser configurados para cambiar la banda de observación.

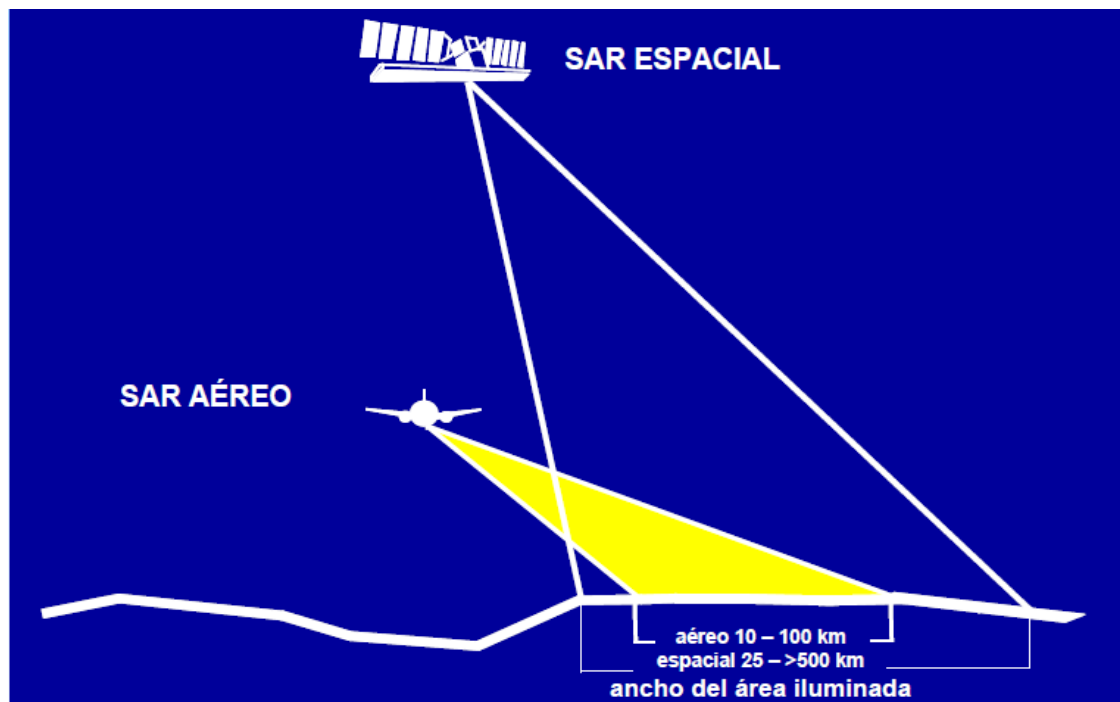


Figura 2: Visión lateral en los sistemas de RADAR. Fuente: CCRS 2006

El funcionamiento básico de un sistema RADAR es generar una señal electromagnética que se emite a través de una antena, en sentido lateral respecto a la plataforma, esta onda al chocar con la superficie u objeto al que va dirigido se dispersa, la parte de estas ondas reflejadas son captadas por la antena. El sistema utiliza la información de la señal emitida y la información de las señales reflejadas captadas para generar los datos relativos a la zona observada.

Como desventajas de las imágenes de RADAR se pueden citar la presencia de ruido y distorsiones difíciles de eliminar y la interpretación de las imágenes que resulta más complicado que en las ópticas.

La zona de trabajo de los sistemas RADAR en el espectro electromagnético se sitúa en el rango de las microondas. En la Figura 3 se muestran las frecuencias RADAR más comúnmente utilizadas, en teledetección y su clasificación en bandas, que se identifican por letras.



Band designation*	Wavelength (λ), cm	Frequency (ν), GHz (10^9 cycles \cdot sec $^{-1}$)
Ka (0.86 cm)	0.8 to 1.1	40.0 to 26.5
K	1.1 to 1.7	26.5 to 18.0
Ku	1.7 to 2.4	18.0 to 12.5
X (3.0 cm, 3.2 cm)	2.4 to 3.8	12.5 to 8.0
C (6.0)	3.8 to 7.5	8.0 to 4.0
S	7.5 to 15.0	4.0 to 2.0
L (23.5 cm, 25 cm)	15.0 to 30.0	2.0 to 1.0
P (68 cm)	30.0 to 100.0	1.0 to 0.3

Tabla 1: Bandas de frecuencia utilizadas en los sistemas de RADAR. Fuente: Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética. NASA, 2017.

En la siguiente tabla se muestran los campos en que son utilizadas las bandas de frecuencia.

Banda	Gama de Frecuencias	Ejemplos de Aplicaciones
VHF	300 KHz – 300 MHz	Follaje, penetración del suelo, biomasa
P-Band	300 MHz – 1 GHz	biomasa, humedad del suelo, penetración
L-Band	1 GHz – 2 GHz	agricultura, gestión forestal, humedad del suelo
C-Band	4 GHz – 8 GHz	océano, agricultura
X-Band	8 GHz – 12 GHz	agricultura, océano, radar de alta resolución
Ku-Band	14 GHz – 18 GHz	glaciología (mapeo de la cubierta de nieve)
Ka-Band	27 GHz – 47 GHz	radares de alta resolución

Tabla 2: Campos de utilización de las bandas de frecuencia utilizadas en los sistemas de RADAR. Fuente: DLR.

Normalmente cada sistema de RADAR opera en la frecuencia adecuada para la misión que ha sido diseñado, aunque algunos RADAR de investigación pueden operar en varias frecuencias.

La banda X, con una pequeña longitud de onda se emplea para obtener las características en zonas con muy pocas variaciones, Ej. Zonas de hielo, ya que los detalles capaces de distinguir el sistema es la mitad de la longitud de la onda.

La banda K es de uso militar.

Por otra parte, las bandas con la longitud de onda más largas tienen mayor penetración en la vegetación y en el suelo, por lo que habrá que elegirlo para trabajar cuando se resisten estas características.

Los sistemas SAR más habituales para monitorizar la superficie de la tierra trabajan en la banda C.

Una característica importante del sistema RADAR es poder controlar la orientación de la onda emitida y recibida en sentido horizontal y vertical.

Es posible configurar el sistema para emitir y recibir en cualquier sentido la orientación HH, VV, HV, VH, tal como se presenta en la siguiente figura

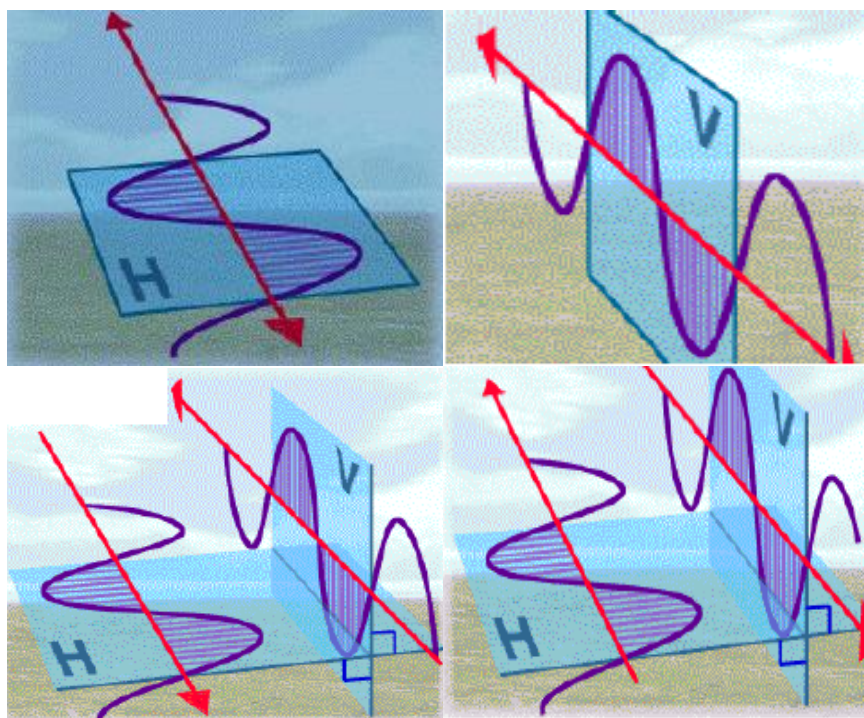


Figura 3: Configuraciones de Polarización. Fuente: ASAR. Product Handbook.2_2, ESA.

Esta característica es importante ya que las ondas de RADAR al tocar con la superficie en estudio, puede cambiar la polarización de la onda. Esto permite por un lado poder conocer las características de la superficie y por otro configurar el sistema para utilizar la polarización más adecuada de acuerdo con las características de la superficie.

Los valores obtenidos con la polarización suponen una ayuda en la clasificación tanto visual como automática, de las características de la superficie observada.

La polarimetría tiene gran aplicación en la agricultura, con la evaluación de ámbitos y el estudio del suelo, y es útil tanto para los agricultores como para las administraciones.

2.1.2. Radar de Apertura Sintética SAR

En un sistema de RADAR con la antena real el sistema mide la amplitud de la onda reflejada, la zona observada, definida como se muestra en la Figura 5 nos marca la resolución del sistema tanto en la dirección de la trayectoria denominada resolución azimutal, como en la dirección de medida, resolución en Rango.

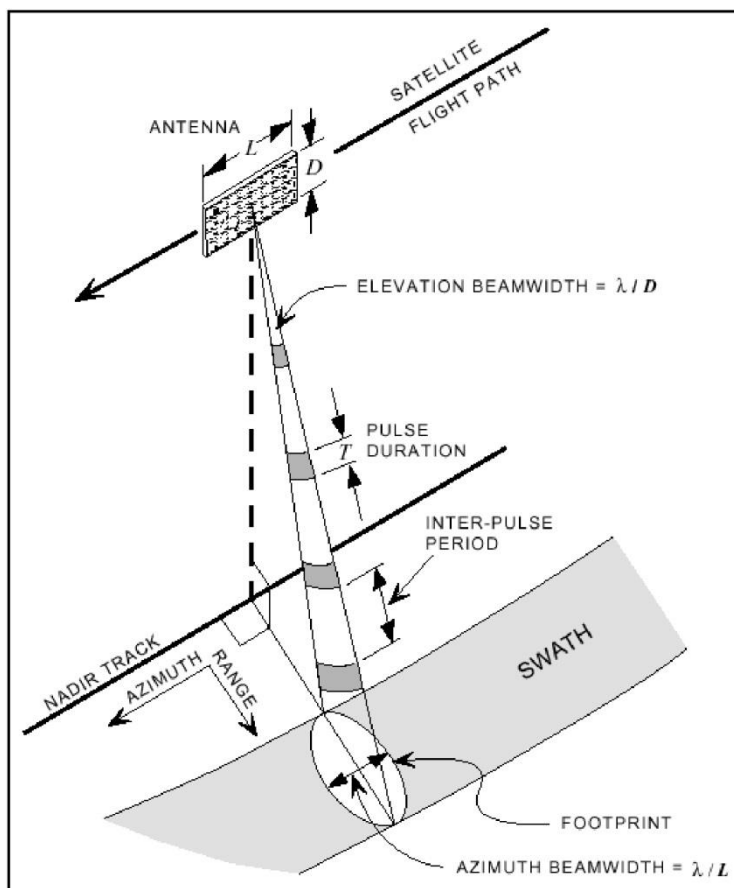


Figura 4: Medición RADAR. Fuente: Sarmap, Agosto 2009.



La resolución en rango se define como:

$$r_R = \frac{c\tau}{2} \quad (1)$$

Donde:

c es la velocidad de la luz

τ la duración del pulso.

La resolución en azimuth se define como:

$$r_{az} = \frac{\lambda R}{L} \quad (2)$$

Donde:

λ es la longitud de onda

R distancia de antena al objetivo

L longitud de la antena.

En esta fórmula vemos que la longitud de la antena influye directamente en la resolución del sistema y podemos comprobar, por ejemplo, que longitud de antena necesitaríamos para obtener una resolución en rango de 150 m. Aplicando la formula tomando los valores:

$$\lambda = 5,6 \text{ cm}$$

$$R = 700 \text{ km}$$

$$L = 0,056 * 700.000/150 = 261,3 \text{ m}$$

Lo cual nos indica que con el sistema RADAR convencional no es posible obtener altas resoluciones en la dirección azimuthal, con una antena física de un tamaño coherente con el resto de la plataforma aérea espacial.

En los sistemas SAR se consiguen imágenes con muy alta resolución, y es configurable según el modo de adquisición de las imágenes.



Resolución en rango del sistema SAR

En la dirección del alcance o resolución de Rango sabemos que es, dependiente de la duración del pulso, a menor duración del pulso mayor resolución, pero hay mayores problemas para detectar las señales reflejadas, para solventar este inconveniente la señal emitida está formada por pulsos modulados linealmente en frecuencia, estos pulsos modulados son llamados “*chirps*”, y con esta forma de trabajo se consigue que la resolución no dependa de la duración del pulso, sino del ancho de banda empleado en su modulación, la nueva ecuación de resolución en Rango, de una manera aproximada, sería:

$$r_R \approx \frac{c}{2B} \quad (3)$$

Donde:

c es la Velocidad

B es el ancho de banda de modulación.

Como ejemplo, teniendo en cuenta que el ancho de banda utilizado es programable y hasta 100 MHz de ancho de banda, en el SAR del satélite espacial Sentinel 1, podríamos tener una resolución máxima de 1,5 m en la dirección del alcance.

Resolución en dirección del azimut del sistema SAR

La resolución en azimut es la que se obtiene en la dirección paralela al avance del SAR. El método para lograr una mayor resolución en esta dirección se consigue grabando y procesando todas las señales recibidas de cada punto en la zona de observación, ya que los puntos permanecen reflejando la señal desde que entran en el haz que envía el radar hasta que salen, con la medición de estas señales de retorno y el procesado adecuado se consigue elevar la resolución de las imágenes, este concepto se presenta esquemáticamente en la siguiente figura, donde se ve que el punto permanece iluminado $2R_a$.

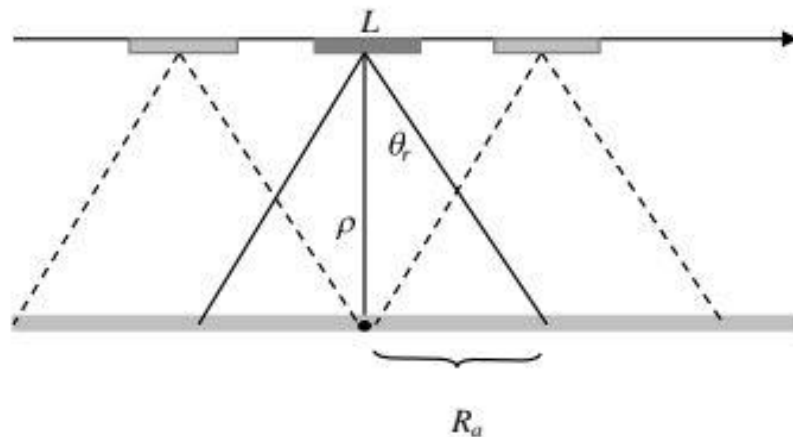


Figura 5: Medición RADAR. Fuente: David Sandwell et al. GMTSAR

La resolución azimutal se define como:

$$r_{az} = \frac{L_a}{2} \quad (4)$$

Donde:

L_a es la longitud de la antena real.

De la fórmula (4), se deduce que la resolución en la dirección del azimut únicamente depende de la longitud de la antena y que cuanto menor sea ésta mayor será la resolución obtenida, aunque el tamaño mínimo de la antena también está condicionado por otros factores como la longitud de onda y la ganancia necesaria para emitir y recibir las señales con el menor ruido posible para obtener imágenes de mayor calidad y posibilitar la obtención de productos finales de mayor calidad.

La imagen SAR está formada por una matriz ordenada en filas y columnas, donde las filas corresponden a la información azimutal, y las columnas en la dirección del alcance o rango, cada elemento de esta matriz contiene un número complejo con la información de la amplitud y la fase recibida del área definida por la resolución en rango y en azimut, que es variable según la configuración de medida del SAR.

Características geométricas de la formación de las imágenes SAR

En la formación de la imagen SAR intervienen principalmente la configuración del sistema SAR y las características de la zona observada, teniendo en cuenta que las



imágenes SAR se generan mediante la medida de la parte, de la señal emitida, que es detectada por el sensor después de reflejarse en la zona de observación,

Las características de la zona observada pueden producir distorsiones geométricas y radiométricas, que debemos tener en cuenta por la influencia que tienen en la imagen obtenida.

Configuración del sistema SAR

La dispersión de la señal, además de las características de la superficie, depende en gran medida de los parámetros de configuración del SAR, los parámetros de configuración más influyentes son:

- Longitud de onda, influye en la dimensión de los objetos a detectar y en la penetración de la señal en la zona de observación, por ejemplo, en la vegetación o en el suelo seco.
- Polarización, influye en la reflexión de la señal, ya que la señal emitida se refleja de una manera distinta en una misma superficie dependiendo de la polarización con la que se emite.
- Ángulo de incidencia, es el ángulo entre la señal del RADAR y la normal a la superficie, y por tanto irá variando a lo largo del alcance, influyendo en la formación de la imagen. Existe además otro ángulo que tiene gran repercusión en la formación de las imágenes, y es el ángulo de incidencia local, este ángulo es el formado por la señal del RADAR y la normal a la superficie real observada, es decir depende de la topografía local.

Características de la zona observada

La estructura de la superficie de observación determina como se van a visualizar los puntos en la imagen, apareciendo más brillantes o más oscuros dependiendo de la forma de la reflexión, cuanto más parte de la señal se refleje en dirección al SAR, más brillante aparecerá en la imagen. En la Figura 6, se muestra las formas de reflexión, según la estructura de la superficie.

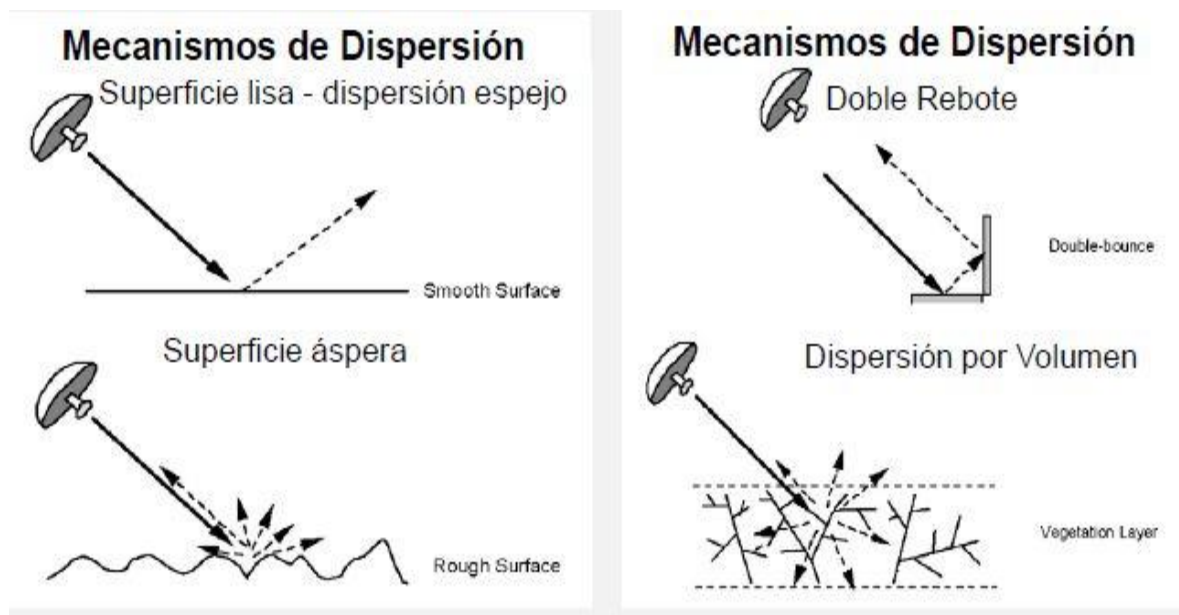


Figura 6: Formas de reflexión, según las características de la superficie. Fuente: ARSET Erika Podest, NASA.

Distorsiones geométricas en las imágenes SAR

Además de la influencia de la estructura de la zona observada en la reflexión de la señal para formar la imagen, la topografía de la zona tiene una gran influencia, dando lugar a una serie de distorsiones en la imagen, que se deben corregir cuando es posible y cuando no es posible, conocerlas para interpretar adecuadamente las imágenes obtenidas con SAR.

En la Figura 7 se muestran las distorsiones geométricas más habituales, en la parte superior se muestra como aparece la representación en la dirección de medida y en la parte inferior, como debe aparecer una vez georreferenciada la imagen y corregidas las distorsiones.

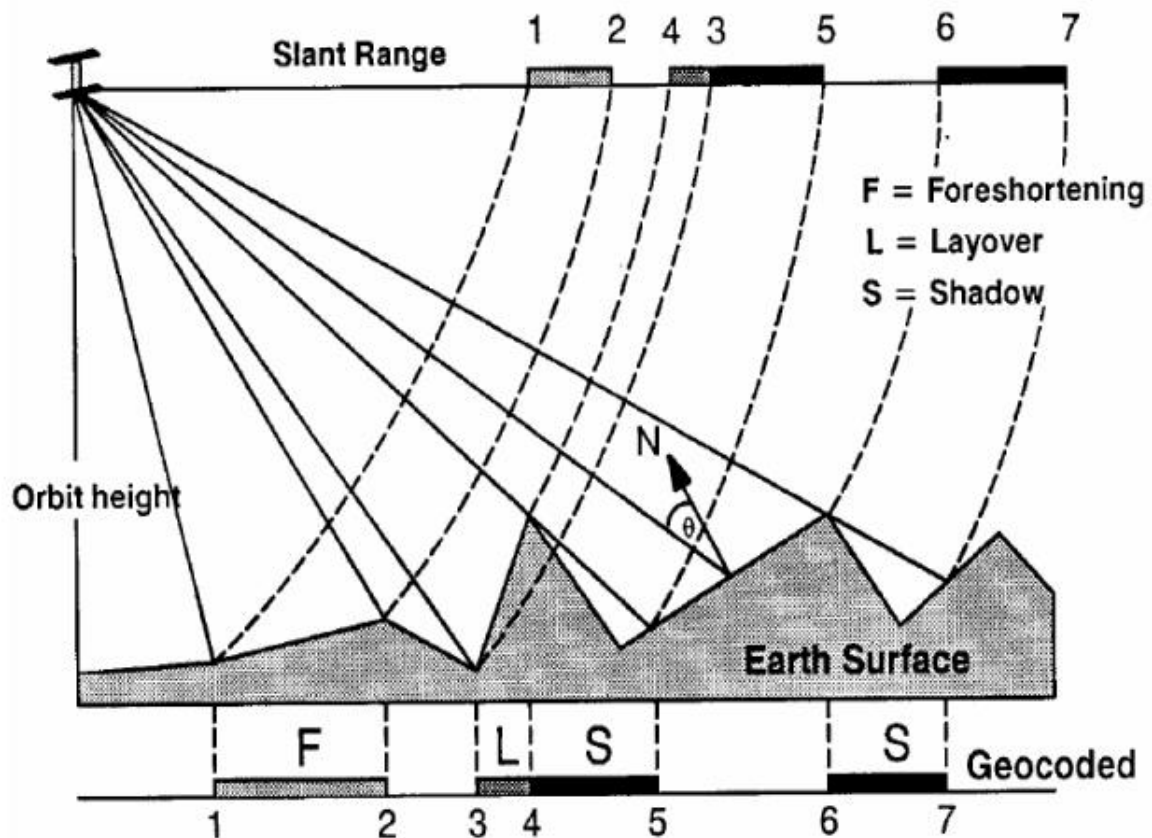


Figura 7: Distorsiones geométricas en la adquisición de las imágenes SAR. Fuente: SAR Basics Tutorial, Luis Veci, Array Systems Computing Inc.

- Foreshortening o Escorzo

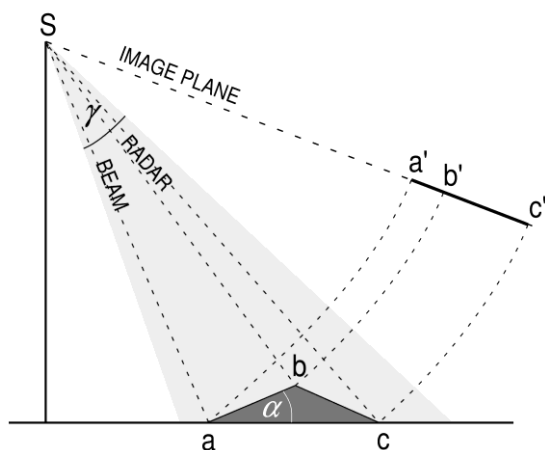


Figura 8: Foreshortening o Escorzo. Fuente: Olmsted, 1993

En la Figura 8 muestra la distorsión conocida como Foreshortening o Escorzo. Debido a que la posición de un punto está determinada por la distancia, al medir el tiempo que tarda la señal en volver a la antena, en zonas de pendiente se produce el acortamiento o comprensión de la imagen. Cuanto menor es el ángulo de la línea de visión mayor es el efecto que se puede producir. El efecto también es mayor cuanto menor sea el ángulo

de incidencia local, que está condicionado por el ángulo de visión y la pendiente del terreno.

Este efecto puede compensarse en proceso de geocodificación con la utilización de un MDE.

- Layover o Inversión por Relieve

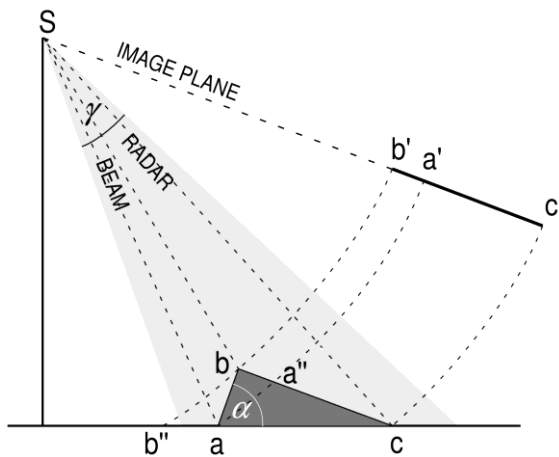


Figura 9: Layover o Inversión por Relieve. Fuente: Olmsted, 1993

En la Figura 9 muestra la distorsión conocida como Layover o Inversión por Relieve. Cuando la parte superior de un terreno está más cerca que la parte inferior, la señal reflejada en la parte superior del terreno se recibirá en la antena antes que la procedente de la parte inferior, con lo cual para el sistema el punto de la parte superior estará más cerca que el de la parte inferior de la ladera. Como se puede ver en la figura, el efecto será más acusado cuanto mayor sea la pendiente del terreno.

terreno.

Este efecto no puede compensarse completamente en el proceso de geocodificación con la utilización de un MDE, debido a que un punto en la imagen puede corresponder a varios puntos del terreno. Los puntos afectados por esta distorsión geométrica aparecerán más brillantes en la imagen.

- Shadow o Sombreado

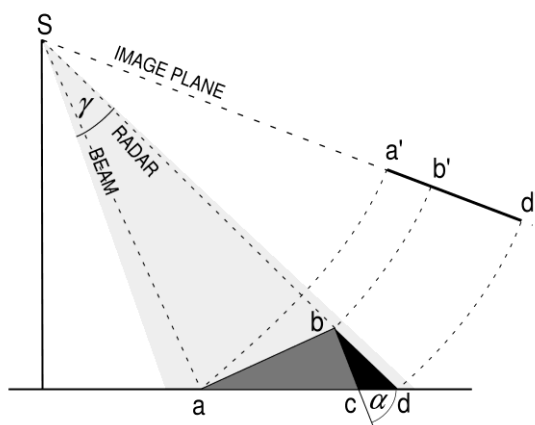


Figura 10: Shadow o Sombreado. Fuente: Olmsted, 1993

En la Figura 10 muestra la distorsión conocida como Shadow o Sombreado. Cuando en una parte del terreno no se refleja la señal, debido a que no llega la señal por el relieve, la imagen de RADAR aparecerá totalmente oscura. Como se puede ver en la figura, el efecto será más acusado cuanto mayor sea la pendiente del terreno. La zona de sombra también se ve afectada por el alcance de la medida, en las zonas medidas en el alcance lejano las sombras serán mayores.



Este efecto no puede compensarse en proceso de geocodificación con la utilización de un MDE, para compensar este efecto se pueden combinar imágenes de la misma zona tomadas en órbita ascendente y descendente del satélite.

2.1.3. Sistema SAR Sentinel 1

Programa Copérnico

Copernicus, según lo describen en ESA, es un programa de observación de la Tierra puesto en marcha por la Comisión Europea (CE), en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana.

La ESA es la responsable de coordinar la distribución de los datos recogidos por más de 30 satélites, mientras que la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), European Environment Agency, se encargará de la información recopilada por sensores en tierra o aerotransportados. La Comisión Europea está a cargo de la iniciativa en nombre de la Unión Europea, definiendo los requisitos y gestionando los diferentes servicios.

El Componente Espacial de Copérnico, gestionado por la ESA, se encuentra en parte en fase operativa, con varios satélites en funcionamiento, distribuyendo a la comunidad de usuarios los datos recogidos por los satélites nacionales, europeos e internacionales que forman parte de las Misiones Colaboradoras de Copérnico.

El Componente Espacial de Copérnico se completa con su segmento de tierra, que permitirá distribuir los datos recogidos por los satélites Sentinel y por las Misiones Colaboradoras a la comunidad de usuarios.

El Componente Espacial de Copérnico constituye la contribución europea al Sistema Global de Sistemas de Observación de la Tierra (GEOSS).

El Componente en tierra, está gestionado por la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA), European Environment Agency, y trabajará con los datos recogidos por un gran número de sensores en tierra, en mar o aerotransportados facilitados por distintas organizaciones europeas e internacionales.



Todos estos servicios se enmarcan en seis grandes categorías: gestión del suelo, el medio marino, la atmósfera, respuesta en situaciones de emergencia, seguridad y cambio climático.

Los satélites Sentinel forman el componente espacial de Copernicus, según se describe en ESA, estará compuesto por los siguientes Satélites:

- Sentinel-1: Servicios terrestres y oceánicos. Tomará imágenes SAR de la superficie de la Tierra. Sentinel-1A fue lanzado en 2014/Sentinel-1B fue lanzado en 2016.
- Sentinel-2: vigilancia terrestre, tomará imágenes ópticas de alta resolución. Sentinel-2A fue lanzado en 2015/Sentinel-2B (2017).
- Sentinel-3: previsión de los océanos, vigilancia climática y medioambiental. Sentinel-3A fue lanzado en 2016. Sentinel-3B (2017).
- Sentinel-4: medirá la composición de la atmósfera desde la órbita geoestacionaria (2019).
- Sentinel-5: medirá la composición de la atmósfera desde la órbita polar (2021).
- Sentinel-6: estudios oceanográficos y del clima (2020).

Se indica la fecha de lanzamiento o la fecha prevista para el mismo.

Satélites SAR Sentinel 1

El sistema satelital Sentinel 1 forma parte del programa Copérnico, en la actualidad está formado por dos satélites Sentinel 1A y Sentinel 1B, las fechas de lanzamiento ha sido en abril de 2014 para el Satélite Sentinel 1 y abril de 2016 para el Sentinel 2 y por tanto las imágenes estarán disponibles unos meses más tarde una vez realizadas las pruebas de funcionamiento.

Estos satélites están equipados con un sensor SAR en banda C, con polarización doble (HH, HV, VV, VH), y dan continuidad a los datos procedentes de los satélites ERS 1 Y 2, RADARSAT 1 y 2, ENVISAT, aunque hay más satélites con capacidad para realizar imágenes SAR, que normalmente operan en otras bandas de frecuencia.

El satélite ERS-1 dejó de estar operativo en el año 2000 y el ERS-2 en el año 2005.



Los dos satélites del sistema Sentinel operan en una órbita heliosincrónica a 693 km de altitud, y con una diferencia de fase entre los dos satélites de 180°.

El ciclo de repetición es de 12 días. El hecho de tener un desfase de 180° hace que el tiempo de paso por un determinado punto sea de 6 días, lo cual es muy importante debido a la influencia que tiene el espaciado temporal en la correlación de las imágenes para ser utilizadas en interferometría.

En la Tabla 3, se muestran las especificaciones del sistema Sentinel 1.

Lifetime	7 years (consumables for 12 years)
Orbit	Near-polar Sun-synchronous orbit at 693 km altitude; 12-day repeat cycle; 175 orbits per cycle
Mean local solar time	18:00 at ascending node
Orbital period	98.6 min
Maximum eclipse duration	19 min
Attitude stabilisation	3-axis stabilised
Attitude accuracy	0.01" (each axis)
Instrument	Right looking with respect to the flight direction
Steering	Zero Doppler yaw steering and roll steering (-0.8" to +0.8")
Attitude profile	Geocentric and geodetic
Orbit knowledge	10 m (each axis, 3 σ) using GPS
Operative autonomy	96 h
Launch mass	2300 kg (including 130 kg mono-propellant fuel)
Dimensions (stowed)	3900 × 2600 × 2500 mm
Solar array average power	5900 W (end-of-life)
Battery capacity	324 Ah
Satellite availability	0.998
S-band TT&C data rates	64 kbit/s telecommand; 128 kbit/s – 2 Mbit/s telemetry (programmable)
X-band downlink data rate	2 × 260 Mbit/s
Launcher	Soyuz from Kourou

Tabla 3: Especificaciones Satélites Sentinel 1. Fuente: ESA



En la siguiente tabla se muestran los parámetros del Sistema SAR en banda C, con el que están equipados los satélites Sentinel 1.

Parameter	Value
Centre frequency	5.405 GHz
Bandwidth	0 ... 100 MHz (programmable)
Polarisation	Selectable between HH+HV and VV+VH
Antenna size	12.3 × 0.821 m
RF peak power (sum of all TRFM, at TRM o/p)	4368 W
Pulse width	5–100 µs (programmable)
Transmit duty cycle	
Max	12%
Strip map	8.5%
Interferometric Wide-swath	9%
Extra Wide-swath	5%
Wave	0.8%
Receiver noise figure at module input	3.2 dB
Pulse repetition frequency	1000–3000 Hz (programmable)
ADC sampling frequency	300 MHz (real sampling) (digital down-sampling after A/D conversion)
Sampling	10 bits
Data compression	Selectable according to FDBAQ
Instrument operation	Up to 25 min per orbit continuously in any of the imaging modes and for the rest of the orbit in Wave mode
Instrument mass	945 kg
DC power	3870 W (Interferometric Wide-swath mode, single or dual polarisation)

Tabla 4: Especificaciones Sistema SAR-C en Satélites Sentinel 1. Fuente: ESA

Modos de operación del sistema Sentinel 1

El modo de operación de la plataforma satelital es configurado por la Agencia Estatal Europea (ESA), cada modo de operación se configura en base a los fenómenos a estudiar.

En la Figura 11 se representan los modos de operación configurables en el Sistema de satélites Sentinel 1.

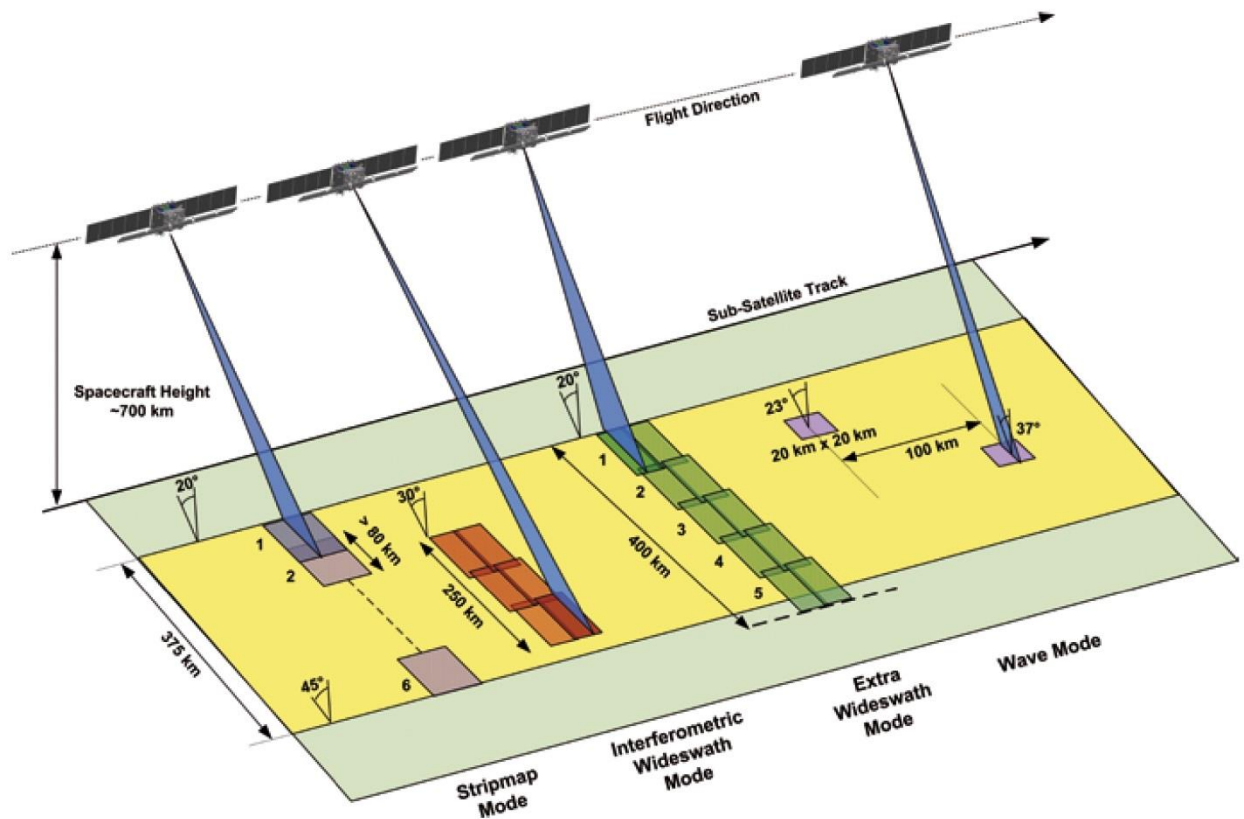


Figura 11: Modos de operación Sistema de satélites Sentinel 1. Fuente: ESA.

En la Tabla 5 aparecen las características de los modos de adquisición de imágenes del Sistema de satélites Sentinel 1.

Parameter	Interferometric Wide-swath mode (IW)	Wave mode (WV)	Strip Map mode (SM)	Extra Wide-swath mode (EW)
Polarisation	Dual (HH+HV, VV+VH)	Single (HH, VV)	Dual (HH+HV, VV+VH)	Dual (HH+HV, VV+VH)
Access (incidence angles)	31° – 46°	23° + 37° (mid-incidence angle)	20° – 47°	20° – 47°
Azimuth resolution	20 m	5 m	5 m	40 m
Ground range resolution	5 m	5 m	5 m	20 m
Azimuth and range looks	Single	Single	Single	Single
Swath	250 km	Vignette 20 × 20 km	80 km	410 km
Maximum noise-equivalent sigma zero (NESZ)	–22 dB	–22 dB	–22 dB	–22 dB
Radiometric stability	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)	0.5 dB (3σ)
Radiometric accuracy	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)	1 dB (3σ)
Phase error	5°	5°	5°	5°

Tabla 4: Características de los modos de adquisición del Sistema Sentinel 1. Fuente:

ESA



Seguidamente se describen los modos de operación posibles en el Sistema de satélites Sentinel 1:

- StripMap Mode (SM)

En este modo de operación el sistema obtiene imágenes de 80 km de ancho en la dirección del alcance o rango mediante la medición de la zona con un pulso continuo, esto hace que la resolución obtenida sea uniforme de 5 m en rango y 5 m en azimut.

En este modo el sistema tiene seis intervalos de ángulos de observación, con lo que, seleccionando uno de estos intervalos, podemos obtener una imagen de 80 km de ancho dentro de la zona comprendida entre 0 y 400 km en la dirección del alcance.

Este modo de adquisición solamente es utilizado en casos extraordinarios o de emergencia.

Tiene una alta resolución uniforme de 5 x 5 m, pero mide solamente una franja de 80 km de ancho en la dirección del alcance.

- Wave Mode (WM)

El modo de adquisición Wave Mode obtiene una imagen de 20 x 20 km y con una resolución de 5 x 5 m.

Como se puede ver en la figura 11 cada imagen está formada con uno de los dos intervalos de ángulos posibles, 23º o 36.5º de ángulo medio, de manera alterna, es decir una imagen con un intervalo y la siguiente con el otro, y con una separación entre imágenes de 100 km.

Las imágenes son obtenidas con polarización simple HH o VV y cada imagen es un producto independiente.

Se emplea principalmente en el estudio de los vientos marinos.

- Interferometría Wide Swath (IW)

Con este modo de operación se genera una imagen de 250 km de ancho en la dirección del alcance y con una resolución de 20 m en alcance y 5 m en azimut.

La imagen obtenida con este método está compuesta por tres subfranjas o sub-swath.

Para la observación de la superficie con este modo de trabajo se escanea la superficie mediante la técnica SAR Progresivo para la Observación del Terreno o TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Seans SAR) que se muestra en la figura 12.

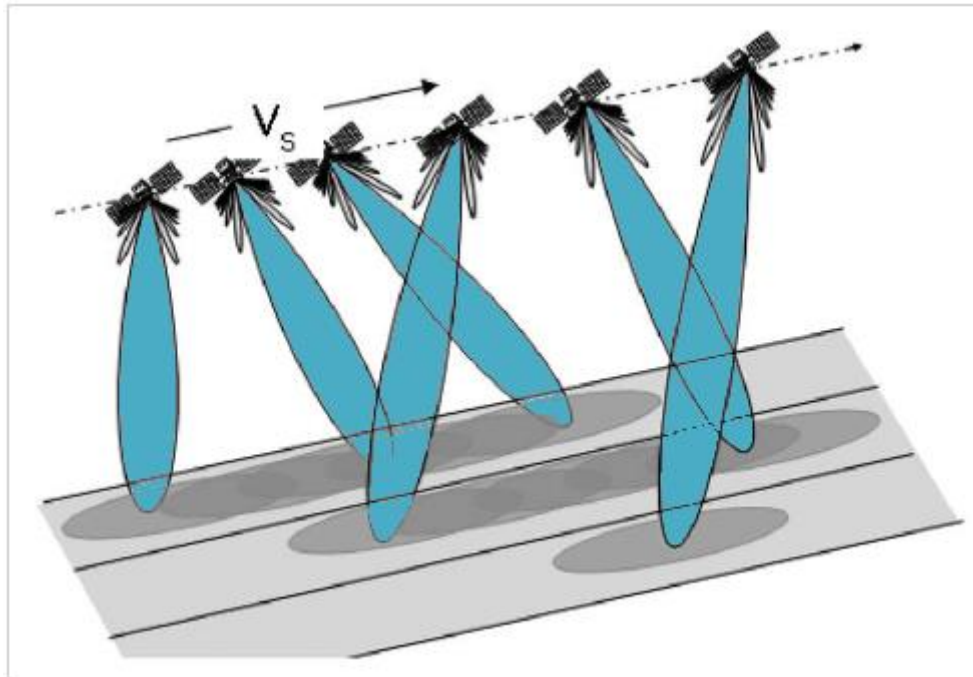


Figura 12: Técnica de observación TOPSAR. Fuente: ESA.

Como se puede ver en la figura, cada subfranja de la imagen es escaneada dirigiendo el haz no solo en la dirección de rango sino también del azimut y en el sentido de adelante hacia atrás, con este método de trabajo dentro de cada subfranja se generan una serie de bandas llamadas ráfagas separadas por una línea, pero con suficiente solapamiento para poder formar una sola imagen mediante el procesamiento.

Este modo de operación es el más habitual de trabajo de la plataforma Sentinel 1. Con las imágenes generadas con este modo de trabajo se va a desarrollar el presente trabajo.

- Extra Wide Swath Mode

El ancho de la imagen obtenida con este modo de trabajo es de 400 km con una resolución de 40 m dirección azimutal y 20 m en dirección del alcance.



Utiliza la misma técnica TOPSAR que el modo IW y comparte las mismas características, pero la imagen está dividida en 5 subfranjas y estas a su vez están compuestas por ráfagas que se tratan adecuadamente en el procesamiento de las imágenes. También pueden ser utilizadas en interferometría.

Formatos de imágenes suministradas por ESA

Los datos adquiridos por los satélites son tratados en distintos niveles y puestos a disposición de los usuarios.

En los siguientes puntos se describe la clasificación de los productos generados con los diversos niveles de tratamiento por parte de la Agencia Espacial Europea.

La descripción de los productos con los distintos niveles de procesamiento es la suministrada por ESA.

Las imágenes procedentes de los satélites Sentinel 1 se ponen a disposición de los usuarios clasificadas en varios niveles según el procesamiento que hayan tenido, estos niveles son:

- Nivel 0: Paquetes de datos crudos (RAW), datos únicamente con el tratamiento efectuado en el satélite, con anotaciones adicionales e información auxiliar procedentes de las lecturas de los datos, para respaldar el procesamiento.
- Nivel 1: Las imágenes procesadas en nivel 1 se suministran en dos formatos:
 - Imagen Compleja de Observación Única (SLC) de rango oblicuo: datos enfocados en geometría de rango oblicuo, vistazo, que contienen información de fase y amplitud en la línea de observación del RADAR.
 - Imagen Proyectada en el Terreno (GRD): Datos enfocados proyectados al rango de tierra, detectados y con múltiples miradas. Los datos se proyectan al rango de tierra utilizando un modelo de elipsoide de la Tierra WGS84, manteniendo la dirección original de la ruta del satélite e incluyendo información completa de referencia geográfica. La información de la fase no está presente en esta imagen.



Los datos del Nivel 1 se pueden encontrar en varias resoluciones, que se muestran en la Tabla 5.

Acq. Mode	Product Type	Resolution Class	Resolution Rng x Azi [m]	Pixel Spacing Rng x Azi [m]	Num Looks Rng x Azi	ENL
SM	SLC		1.7x4.3 to 3.6x4.9	1.5x3.6 to 3.1x4.1	1x1	1
	GRD	FR	9x9	3.5x3.5	2x2	3.7
		HR	23x23	10x10	6x6	29.7
		MR	84x84	40x40	22x22	398.4
IW	SLC		2.7x22 to 3.5x22	2.3x14.1	1x1	1
	GRD	HR	20x22	10x10	5x1	4.4
		MR	88x87	40x40	22x5	81.8
EW	SLC		7.9x43 to 15x43	5.9x19.9	1x1	1
	GRD	HR	50x50	25x25	3x1	2.8
		MR	93x87	40x40	6x2	10.7
WV	SLC		2.0x4.8 3.1x4.8	1.7x4.1 2.7x4.1	1x1	1
	GRD	MR	52x51	25x25	13x13	123.7

Tabla 5: Resolución de productos de Nivel 1. Fuente: ESA

- Nivel 2: Productos oceánicos, campo de vientos oceánicos, espectros de ondas de oleaje y corrientes superficiales según los datos SAR.

Nomenclatura de los productos Sentinel 1

En la nomenclatura de los productos que ESA pone a disposición de los usuarios figura el nombre del satélite que realizó la adquisición, el tipo de producto, el formato de la imagen y la fecha de adquisición de los datos. En las siguientes figuras se muestra la nomenclatura utilizada para denominar los productos generados con los SAR y puestos a disposición de los usuarios:

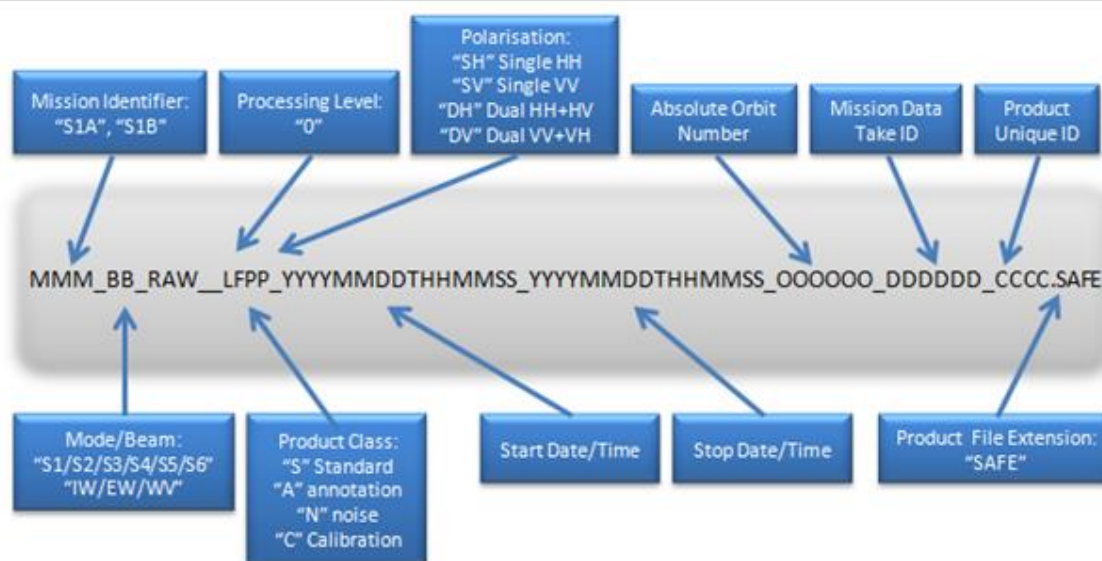


Figura 13: Nomenclatura de productos de Nivel 0. Fuente:

<https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-0-sar/products-algorithms/level-0-products/formatting>

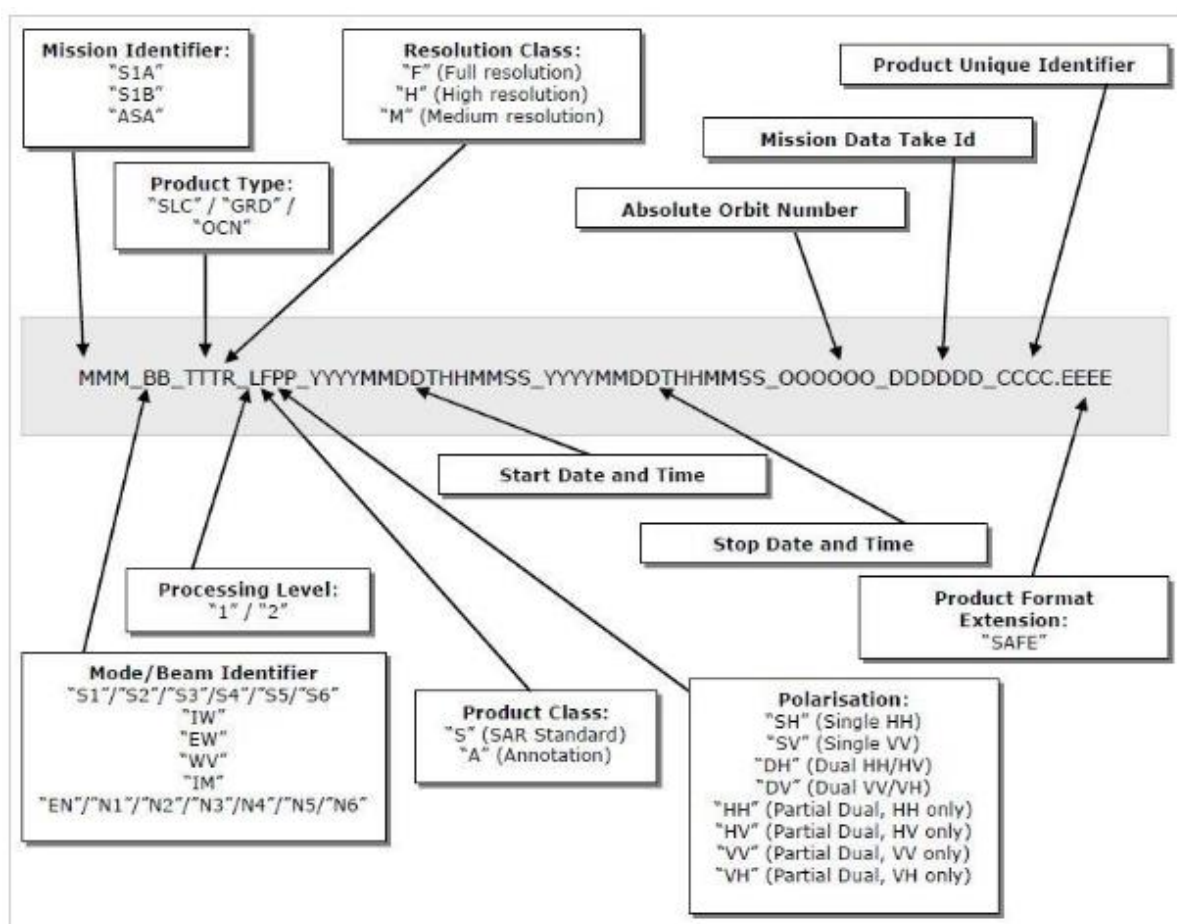




Figura 14: Nomenclatura de productos de Nivel 1. Fuente:

<https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-0-products/formatting>

Modo de adquisición	Componente del producto L2 OCN	Producto de entrada L1
SM	OSW	SLC
	VIRGINIA OCCIDENTAL	GRD
	RVL	SLC
IW	VIRGINIA OCCIDENTAL	GRD
	RVL	SLC
EW	VIRGINIA OCCIDENTAL	GRD
	RVL	SLC
VIRGINIA OCCIDENTAL	OSW	SLC
	VIRGINIA OCCIDENTAL	SLC
	RVL	SLC

Tabla 6: Nomenclatura de productos de Nivel 2. Fuente:

<https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-2-algorithms>

La descripción de la nomenclatura completa de los productos, según puede consultarse en las páginas web de la ESA:

- Productos de Nivel 0: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-0-products/formatting>
- Productos de Nivel 1: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-products/formatting>
- Productos de Nivel 2: <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-2-algorithms>



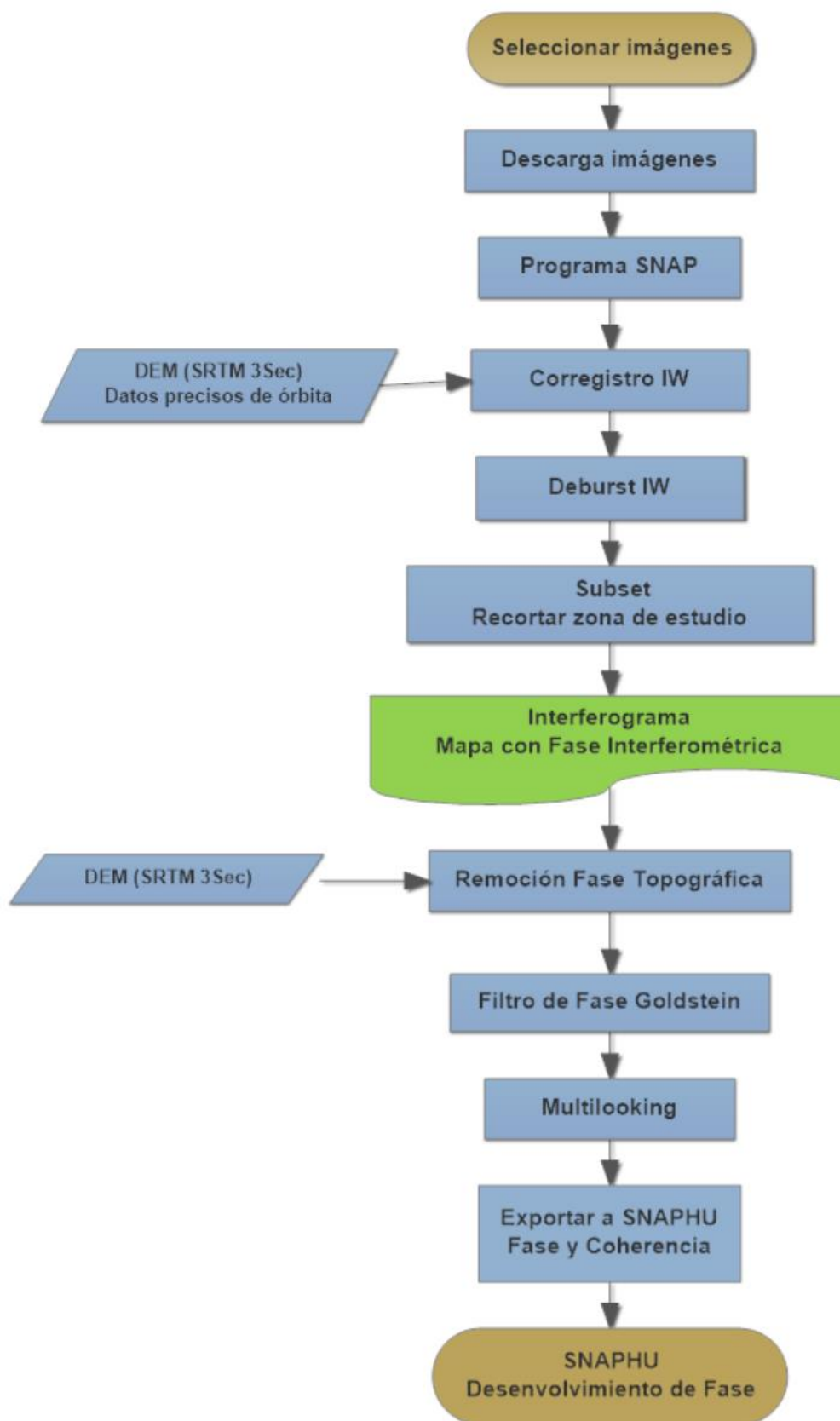
2.2. Metodología del proceso

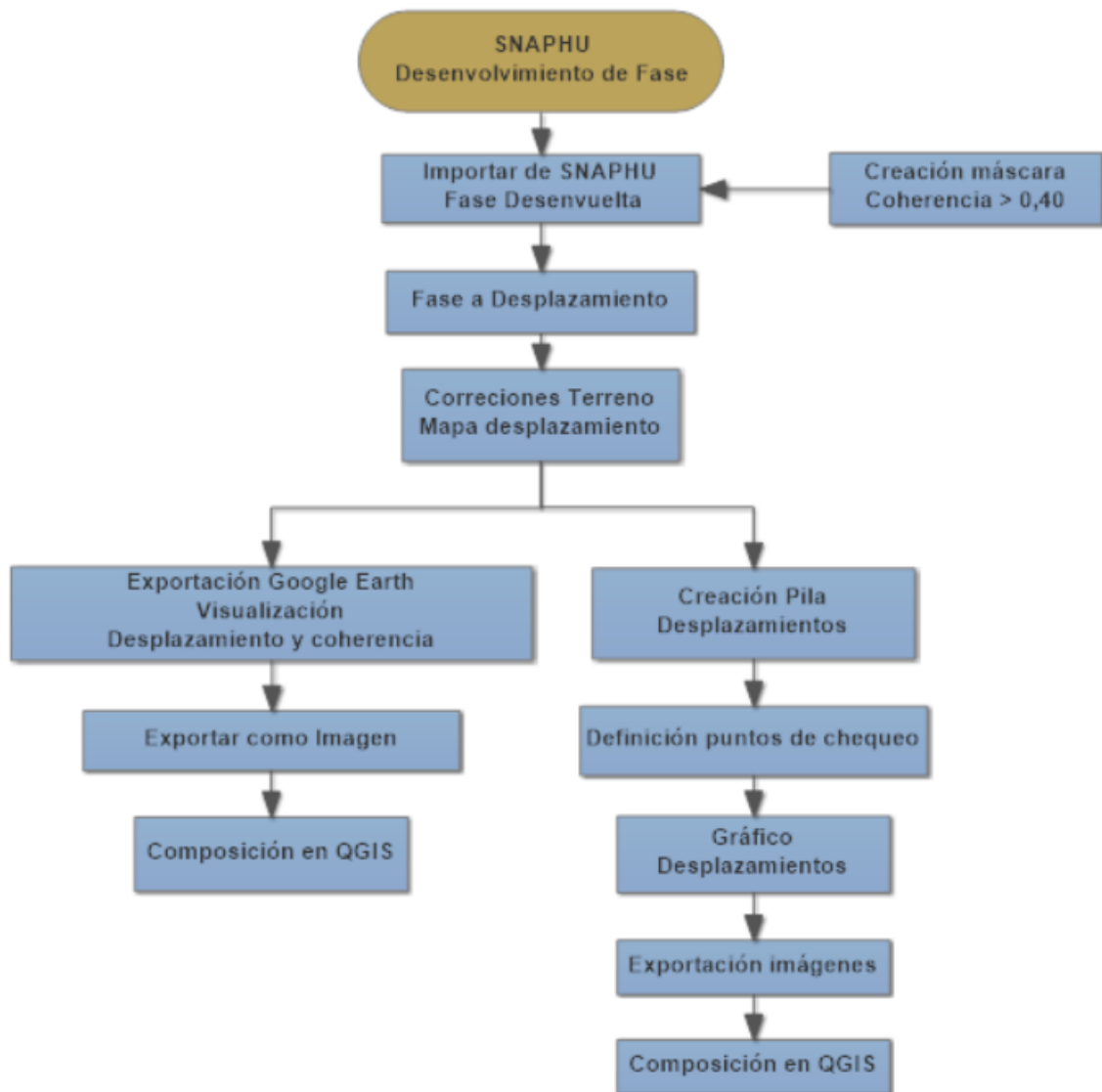
2.2.1. Flujo de trabajo

Los procesos a realizar para desarrollar el trabajo y lograr los objetivos propuestos, se pueden dividir en cuatro fases:

1. Recopilación y revisión bibliográfica de documentación sobre interferometría.
2. Procesamiento de imágenes SAR.
3. Obtención del desplazamiento.
4. Comparación de resultados.

La metodología seguida en los puntos 2 y 3, se muestra en los siguientes diagramas de flujo:





Antes de proceder a detallar la metodología a seguir, se describe la composición de las imágenes SAR con las que vamos a trabajar, que describe la técnica de Interferometría, en cuya utilización se basa el presente trabajo.

2.2.2. Características de la imagen SAR

Como hemos visto anteriormente la imagen se forma con las lecturas de las señales reflejadas en la superficie que son captadas por la antena. Estas lecturas se procesan en el satélite y generan en cada punto de la imagen un número complejo, siendo i la parte real, y q la imaginaria, A la amplitud de la señal y ϕ la fase medida, tenemos:

$$i = A \cdot \cos \phi \quad (3)$$



$$q = A \cdot \sin \phi \quad (4)$$

Estos dos valores son los existentes en cada píxel de la imagen, por tanto, podemos extraer la información, la fase y la intensidad del punto.

$$A = \sqrt{i^2 + q^2} \quad (5)$$

$$\Phi = \text{atan} \left(\frac{q}{i} \right) \quad (6)$$

$$\text{Int} = i^2 + q^2 \quad (7)$$

Hay que hacer notar que la fase, proporciona la distancia entre la antena y el punto, no es la fase el número total de ciclos, sino que se encuentra limitada en el rango $[-r, r]$; por lo que para conocer la distancia real habrá que realizar el desenvolvimiento de la fase.

2.2.3. Interferometría con imágenes SAR

En este apartado se realiza una elemental explicación de la técnica InSAR y DinSAR y las variables que en ellas intervienen.

Interferometría InSAR

La interferometría SAR conocida como InSAR, se basa en obtener la posición de un punto en base a la posición del punto obtenido en la observación del mismo punto desde dos posiciones ligeramente distintas de un sistema SAR.

Como hemos visto anteriormente las imágenes SAR contienen en cada píxel información de la amplitud y la fase correspondiente a los elementos que representan dicho píxel, la amplitud depende de las características de los elementos dispersores presentes en la zona observada y la fase contiene la información de la distancia de la antena a la zona representada.

Un interferograma con dos imágenes SAR, mediante un proceso en el cual cada píxel de la primera imagen se multiplica por el conjugado del mismo píxel de la segunda imagen, se obtiene una nueva imagen en la que los valores que contiene son la



multiplicación de los valores de la amplitud y la diferencia de fase en cada uno de los píxeles de una imagen respecto a la otra.

El método InSAR puede utilizarse para obtener la altura de los puntos sobre una superficie de referencia y por tanto generar modelos digitales del terreno.

En las señales recibidas, además de la distancia al punto y las características de la superficie, que se mantienen más iguales cuanto menor es la temporal, influyen otras variables como el ruido inherente al sistema de medida y las condiciones atmosféricas que influyen en la calidad del producto obtenido.

Interferometría Diferencial DinSAR

En el apartado anterior veíamos que podíamos determinar la posición de un punto mediante el cálculo de la variación de distancia que existe al observar el punto desde dos posiciones distintas de los satélites. Puede darse el caso también que en la variación del valor de la distancia contenga también una variación en la posición del punto.

Para poder aislar y cuantificar el valor de la diferencia de fase correspondiente al desplazamiento del punto se desarrolló la técnica Interferometría Diferencial SAR o abreviadamente DinSAR.

En la interferometría Diferencial SAR los efectos topográficos incluidos en la fase del punto se eliminan utilizando un Modelo Digital de Elevación de la zona, en el valor de la fase, dando así origen al interferograma diferencial.

Al haber restado la componente topográfica en el valor de la fase nos queda como la suma de varios valores que contribuyen en el valor total de la fase, a este valor de la fase contribuyen el desplazamiento sufrido por el punto, las condiciones atmosféricas y el ruido inherente al sistema de medida.

2.2.4. Flujo de proceso para la obtención del desplazamiento del terreno

La metodología a seguir se muestra en los diagramas de flujo que se muestran en el punto 2.2.1.



En los siguientes apartados se describen las operaciones a realizar, en el tratamiento de imágenes para llegar a obtener el desplazamiento sufrido por el terreno.

Tal como se ve en el diagrama, las operaciones a realizar son:

- Selección de imágenes.
- Corregistro.
- Interferograma Diferencial.
- Eliminación de ráfagas y Filtrado.
- Desenvolvimiento de fase.
- Aplicar máscara de coherencia.
- Convertir fase a desplazamiento.
- Aplicar correcciones del terreno a las bandas de fase y coherencias.
- Exportar imágenes con los valores del desplazamiento.
- Analizar el desarrollo del desplazamiento.
- Matemática de bandas, desplazamiento total.
- Exportar imágenes individuales y una con los desplazamientos totales.
- Exportar imagen de coherencia.
- Presentación y análisis en el Qgis.

Las operaciones desde el corregistro a la exportación de las imágenes, excepto el desenvolvimiento de fase, se realizan con el programa SNAP.

El programa SNAP es desarrollado y distribuido de forma libre, por la Agencia Espacial Europea (ESA). Este programa dispone de las herramientas necesarias para el procesamiento y análisis de las imágenes SAR.

Selección de imágenes

Tal como se indicó en el punto 1.1, la zona de estudio se encuentra comprendida en las coordenadas:

- (716228, 4761951)
- (716228, 4761617)



- (716705, 4761951)
- (716705, 4761617)

Para la elección de las imágenes de trabajo es imprescindible conocer la orografía de la zona se pueden presentar distorsiones importantes en las imágenes SAR.

Si en la zona de estudio existen laderas es necesario conocer su orientación, si la ladera tiene orientación Norte-Sur es poco probable que se obtengan buenos resultados en la medida de los desplazamientos al efectuar el sistema las mediciones en sentido lateral. Por este mismo motivo, de la línea de visión lateral, a la hora de elegir las imágenes debemos tener en cuenta si la órbita del satélite es ascendente o descendente.

La línea de visión (LOS), Line of Sight, en la órbita ascendente mira hacia el Este y en sentido descendente hacia el Oeste, aunque se pueden obtener mejores resultados sin que la orientación sea la más adecuada para la orientación de la zona de estudio.

Además de los criterios relacionados se han de tener otros que consideren la base temporal, la línea base perpendicular y la coherencia entre las imágenes seleccionadas. Se llama base temporal a la diferencia en días existente entre las dos adquisiciones y tiene influencia ya que, para medir deformaciones, ha de ser suficiente para detectar el cambio, pero no tan grande para que haya una gran pérdida de coherencia entre las dos imágenes.

La línea base perpendicular es la distancia perpendicular existente entre la señal de los dos satélites para medir los puntos, y la importancia de este parámetro, según se demuestra en la extensa literatura existente sobre el tema, los pares interferométricos distanciados, con una línea base perpendicular grande son adecuados para obtener MDE, y pares interferométricos con línea base perpendicular pequeña son adecuados, para medir deformaciones, valga como ejemplo que 1 m de diferencia en topografía produce $3,2^\circ$ en variación de fase y para producir esta misma variación de fase producida por un desplazamiento, únicamente serán necesarios únicamente 0,2 mm de deformación.



Corregistro de las imágenes

El corregistro de las imágenes SAR es un proceso fundamental en el proceso interferométrico, con este proceso se consigue posicionar los píxeles de una imagen con los mismos píxeles correspondientes en otra imagen, para luego efectuar correctamente el interferograma.

Para efectuar el proceso, se selecciona una imagen, normalmente la más antigua, como imagen *master* y la otra imagen se selecciona como esclava. El programa SNAP tiene implementado los procesos de cálculo para efectuar este proceso.

Con la realización de este proceso se alinean los píxeles de la imagen seleccionada como esclava con los de la imagen seleccionada como maestra.

Para ejecutar el programa este proceso necesita disponer de los datos precisos de las órbitas de los satélites y de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona. Este tiene la opción de descargar automáticamente de Internet los datos precisos de las órbitas y un MDE.

SNAP únicamente permite seleccionar el tipo y el método de remuestreo para interpolar los puntos de la imagen esclava para alinearlos con la imagen maestra.

En este trabajo utilizaremos el MDE SRTM 3sec.

El MDE SRTM 3sec utilizado, es un modelo digital de elevación de aproximadamente 30 m de resolución, que se realizó mediante la misión espacial Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), en el año 2000, para obtener un MDE del 80% de la superficie terrestre y con una alta resolución.

Debido a que las imágenes de Sentinel 1 se forman con la técnica TOPSAR, en el programa se ha de elegir la opción **S-1 TOPS Corregistration**. Con esta modalidad únicamente permite corregistrar una subfranja y con una única polarización.

Eliminación de ráfagas (Deburst)

Debido a la técnica de medida, TOPSAR, que utiliza Sentinel 1, la imagen estaba formada por 3 subfranjas y dentro de estas se crean bandas llamadas ráfagas con un solape entre ellas.

Este proceso une las distintas ráfagas teniendo en cuenta el solape, con lo que desaparecen las líneas que separan las distintas ráfagas, quedando una imagen continua.

Formación del Interferograma y Estimación de la Coherencia

Como se ha explicado anteriormente la técnica DinSAR se basa en la obtención de los datos de interés, con el procesamiento de dos imágenes SAR, que da como resultado la formación del interferograma.

El interferograma se forma multiplicando la imagen maestra con el complejo conjugado de la imagen esclava. Este proceso da como resultado una nueva imagen compleja en la que la amplitud es la multiplicación de la amplitud de las dos imágenes, y la fase, fase interferométrica, es la diferencia de fase de las dos imágenes procesadas.

En la Figura 15 se muestran los parámetros más importantes en la medición de las imágenes SAR.

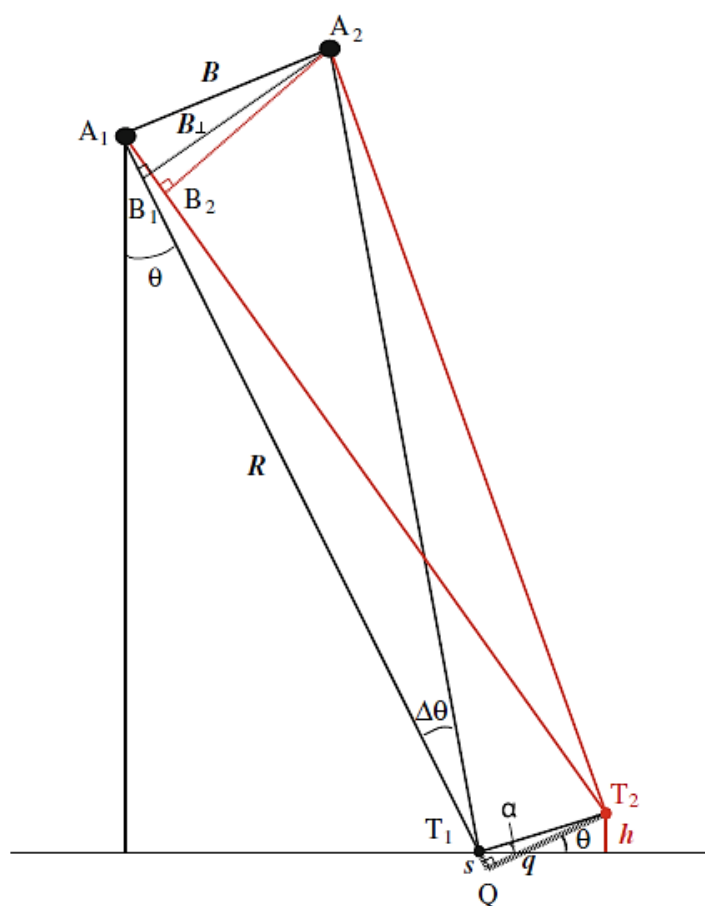


Figura 15: Medición de punto en dos imágenes. Fuente: InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes from Space.



Dónde:

Bn base perpendicular entre los satélites.

R distancia entre el sensor y la superficie.

h diferencia de altura.

θ ángulo de incidencia.

Esta diferencia de fase obtenida y según la teoría de la técnica InSAR, se puede considerar formada por los siguientes términos que contribuyen, en mayor o menor medida, en el valor de la diferencia de fase:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{flat}} + \Delta\varphi_{\text{elev}} + \Delta\varphi_{\text{disp}} + \Delta\varphi_{\text{atmo}} + \Delta\varphi_{\text{noise}} \quad (8)$$

Donde:

$\Delta\varphi_{\text{flat}}$ es la parte del valor del desplazamiento provocado por la curvatura de la tierra al calcular la posición de los puntos y tiene un valor de:

$$-\frac{4r}{\lambda} \frac{Bns}{R \tan \theta} \quad (9)$$

$\Delta\varphi_{\text{elev}}$ es la contribución de la topografía al valor de la diferencia de fase, su valor puede escribirse como:

$$-\frac{\Delta q B n 4\pi}{\sin \theta R o \lambda} \quad (10)$$

$\Delta\varphi_{\text{disp}}$ es el valor del desplazamiento que está presente en el valor de la diferencia de fase:

$$+\frac{4rd}{\lambda} \quad (11)$$

$\Delta\varphi_{\text{atmo}}$ es la contribución de la diferencia en las condiciones atmosféricas entre las dos adquisiciones que provocan retraso en la señal y por tanto variación de la fase:

$\Delta\varphi_{\text{noise}}$ el valor de la fase producido por varios factores que las características de la zona, por la diferencia temporal, que provoca cambios en la dispersión de la señal, diferentes ángulos de visión y cambios volumétricos en la zona.

Para obtener la mayor precisión, nos interesa eliminar toda la contribución al valor de la diferencia de fase que no sea la referente al desplazamiento.



En el proceso de formación del Interferograma se elimina el término $\Delta\varphi_{\text{flat}}$, correspondiente a la curvatura de la tierra, para ello se utilizan los metadatos que contienen los archivos que se descargan con la imagen SAR y los datos de las órbitas de los satélites, que se descargan automáticamente de Internet.

A la vez que el proceso de creación del interferograma se hace también una estimación de la coherencia.

La coherencia calculada entre dos imágenes SAR es un indicativo del ruido existente en la fase. La coherencia mide la decorrelación entre las dos imágenes, y en esta decorrelación influyen el tiempo pasado entre adquisiciones (γ_T), parámetros geométricos (γ_G) por los errores en la órbita, decorrelación volumétrica (γ_V) producida por los cambios en la vegetación y decorrelación provocada en el procesamiento (γ_P).

La coherencia es la multiplicación de estos factores, por lo que la coherencia es:

$$\gamma = \gamma_T \cdot \gamma_G \cdot \gamma_V \cdot \gamma_P \quad (12)$$

La coherencia se estima considerando una ventana de píxeles, y haciendo la media de los píxeles que están contenidos en ella, tomando un valor entre 0 y 1. Un valor inferior a 0,20 no se utilizan en la fase interferométrica. Las áreas con más alto valor de coherencia aparecen más brillantes en la imagen de coherencia.

Eliminación de ráfagas o Deburst

Mediante la ejecución de este proceso se elimina las líneas de separación de las ráfagas existentes en la subfranja. También está disponible una opción de juntar subfranja en el caso de ser necesario.

Recorte de la zona de estudio

Si la zona de estudio no abarca toda la imagen, podemos efectuar un recorte con la zona de interés únicamente. Como sabemos el archivo de imagen SAR contiene varias imágenes, con esta opción nos recorta todos los datos con lo cual los tiempos de proceso son menores.



El recorte se puede indicar por la extensión de la vista en pantalla, píxeles de la imagen o Coordenadas Geográficas.

Remoción de la fase topográfica

En la ecuación (8), vemos todos los factores que contribuyen al valor de la diferencia de fase medida, y como hemos visto nos interesa averiguar el valor real del desplazamiento.

Al realizar el interferograma eliminábamos la contribución de la curvatura de la tierra. La contribución de la fase topográfica al valor del desplazamiento de fase tiene un valor de:

$$\frac{\Delta q B n 4 \pi}{\sin \theta R o \lambda}$$

Como vemos en esta ecuación depende de la altura q , del punto y de la Bn que es la distancia perpendicular entre las señales de medida, que es conocida como Base perpendicular. Debido a que contribuye directamente proporcional al valor de la fase topográfica, es conveniente que el valor Bn sea lo menor posible para el cálculo de desplazamientos.

Este valor se calcula y es necesario tenerlo en cuenta a la hora de elegir las imágenes para realizar la interferometría.

Para realizar este proceso se realiza un interferograma con un Modelo Digital de Elevaciones de la zona simulando una imagen SAR, al igual que cuando se realiza un interferograma se utiliza el MDE SRTM 3sec, que lo descarga automáticamente el programa.

Al realizar este proceso creamos el interferograma diferencial, en el que tendremos la diferencia de fase del desplazamiento más aproximada al desplazamiento real.



Filtrado de la fase

Una vez realizados los interferogramas para eliminar la influencia de la curvatura de la tierra y la fase topográfica, solamente nos queda en la diferencia de fase con la contribución de las condiciones atmosféricas y el ruido. La contribución en la diferencia de fase por las condiciones atmosféricas las consideramos despreciables, aunque en algunas ocasiones, cuando se realizan las adquisiciones hay unas condiciones climatológicas muy distintas puede tener una influencia considerable.

En la fase interferométrica todavía nos queda un valor que consideramos como contribución por ruido, este valor, aunque no se puede eliminar completamente, sí que se puede minimizar con las operaciones de filtrado.

El ruido en la fase interferométrica puede ser principalmente debido, al igual que la coherencia, a la decorrelación, provocada por la distancia temporal, la falta de precisión en la geometría a los cambios en los dispersores y a errores de procesamiento, para minimizar los valores del ruido se emplean principalmente dos filtros: el filtro de fase de Goldstein y el proceso Multilooking.

- Filtro de Goldstein

El filtro de Goldstein fue desarrollado por Goldstein y Werner en 1998, y es un filtro adaptativo no lineal que consiste básicamente en analizar los píxeles de la imagen, según una ventana definida y aplicarle a un píxel el valor según los valores de los píxeles contenidos en la ventana, es adaptativo ya que su aplicación depende del entorno donde se esté aplicando. Este filtro obtiene mejores resultados en las zonas con alta coherencia.

- Filtrado Multilooking

Con el filtro Multilooking se realiza una reducción del ruido tomando como valor del píxel la media del número de píxeles que se toman en el valor indicado para realizar el Multilooking. El valor se indica para la dirección del alcance y la dirección del azimut, con este proceso se pierde resolución espacial.

Normalmente, dependiendo de los valores indicados, se genera una imagen con la misma resolución de los píxeles en rango que en azimut.



El filtrado con Multilooking facilita la aplicación del algoritmo para el desenvolvimiento de la fase, teniendo mejores resultados.

Desenvolvimiento de la Fase

En las imágenes SAR no se calcula y almacena la fase total que correspondería a la distancia de ida y vuelta de la señal entre la antena y el punto, sino que solamente se almacena la diferencia de fase cuando se recibe, por lo tanto, la fase total, con la que se podría conocer la distancia directamente, no se conoce. La fase total será el valor de la fase almacenada, más un número entero de ciclos. El problema del desenvolvimiento de fase se ve agravado por la existencia de ruido en la fase y las distorsiones geométricas.

Existen varios algoritmos para efectuar el desenvolvimiento de fase, hay que hacer notar que la solución no es única y puede contener errores o inexactitudes.

En este trabajo voy a utilizar el algoritmo desarrollado por Chen y Zebker, SNAPHU.

El algoritmo SNAPHU (Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping), Algoritmo de Flujo de Red de Costo Estadístico para el Desenvolvimiento de Fase, ha sido desarrollado por Curtis Chen and Howard Zebker en la Universidad de Stanford. Inicialmente estaba programado para su ejecución sobre un sistema Linux, por lo que para ejecutarlo en Windows es necesaria la instalación de una máquina virtual que simule el entorno Linux. Actualmente ya se encuentra disponible el algoritmo para ejecutarlo en el entorno Windows.

Fase a desplazamiento

Una vez desenvuelta la fase, para mejorar la visualización de los datos, creamos una máscara de coherencia, los valores de coherencia a considerar pueden ser de 0.30 a 0.60, dependiendo de las características de la zona, con esto conseguimos que los puntos que tienen una coherencia menor de la coherencia indicada no se muestren, ya que los valores obtenidos en estos puntos pueden no ser muy fiables.



Hemos de tener en cuenta que la medida que nos indica la diferencia de fase corresponde al desplazamiento en el sentido del alcance, mediante este proceso obtenemos el desplazamiento en vertical.

Geocodificación

Hasta este punto hemos trabajado con las imágenes creadas por el sistema SAR.

Para poder visualizar los mapas generados y representarlos en su localización correcta necesitamos transformar las coordenadas de los puntos de la localización imagen SAR a un sistema de coordenadas cartográfico. Para realizar el proceso le indicamos las bandas que queremos referenciar y se necesita un MDE, que como en las ocasiones anteriores descarga de Internet automáticamente.

El sistema de referencia que elegimos es World Geodetic System 84 (WGS84).

Al visualizar los datos vemos que los píxeles ya no tienen la situación uniforme que tenían antes. Desde la ventana de visualización del mapa, podemos exportar la imagen en formato kmz, con la ventaja que nos exporta también la leyenda indicando los desplazamientos con los colores.

Al tener los datos georreferenciados en WGS84 podemos visualizarlos en Google Earth en una correcta localización.

Tenemos también la posibilidad de exportar los datos en varios formatos desde la opción de menú File>Export, en este caso vamos a exportar el mapa de desplazamientos generado en formato Geotiff, con lo cual nos genera un archivo ráster con la información del desplazamiento en cada píxel.

Una vez tenido los valores de desplazamiento en formato Geotiff presentaremos los valores de desplazamiento con el programa de sistemas de Información Geográfica QGIS.



3. DESARROLLO DEL PROCESO

3.1. Selección y obtención de datos

3.1.1. Selección de imágenes

En el apartado selección de imágenes del punto **2.2.4** se indicaban los criterios para la selección de imágenes.

Una vez fijado el criterio de sentido de la órbita fijamos las fechas en las que necesitamos las imágenes.

En este trabajo vamos a realizar el estudio entre las fechas que tenemos mediciones de control con GPS es decir de julio de 2016 a julio de 2017, descargaremos una imagen por cada mes, para intentar minimizar en lo posible la decorrelación temporal. Puede darse el caso que tengamos que desechar alguna imagen porque no se pueden obtener los resultados correctos, con lo cual descargaríamos otra imagen para realizar el proceso.

3.1.2. Descarga de datos

Las imágenes están disponibles para su descarga y son de distribución gratuita, es necesario registrarse para acceder a la descarga.

<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

Para realizar la selección de las imágenes es necesario indicar la zona por coordenadas o en pantalla y en un formulario se realiza un filtro indicando fechas, productos, órbitas, etc.

Realiza el filtrado indicado y descargamos los archivos. Para este trabajo vamos a utilizar los archivos en formato SLC y tienen un tamaño aproximado de 4Gb, se descargan comprimidos, pero no es necesario descomprimirlos ya que lo hace el programa cuando utiliza las imágenes.

En las figuras siguientes se muestran las pantallas de selección de imágenes para descargar de la página de la ESA.

Se fijan los criterios de selección en el formulario y se realiza un filtrado de las imágenes que lo cumplen.

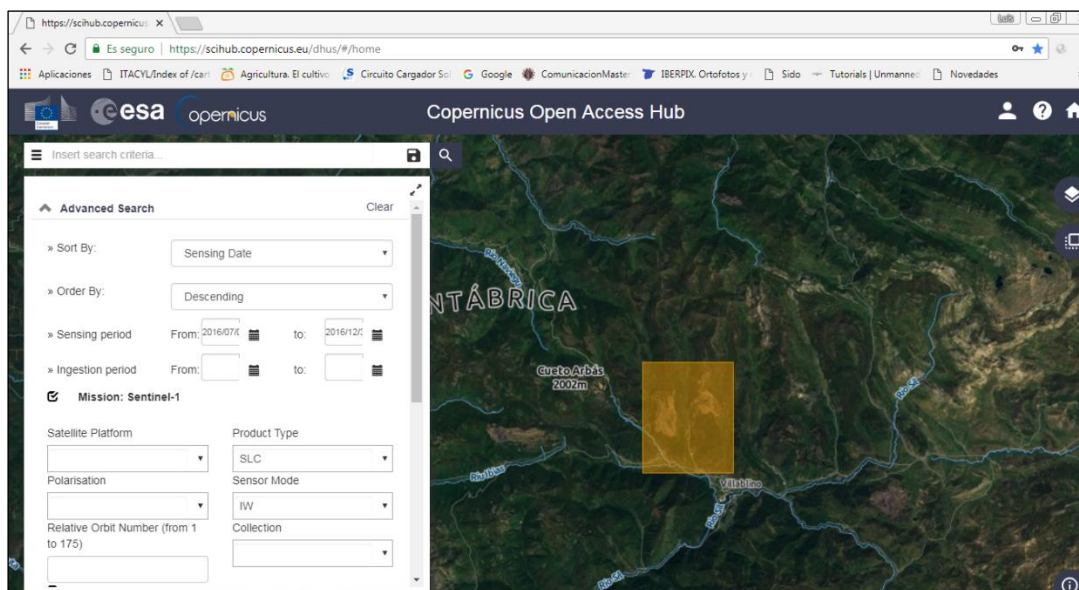


Figura 16: Pantalla de selección de imágenes. Fuente: ESA

En la figura siguiente se muestra la pantalla con la información de los metadatos de las imágenes, podemos consultar los datos y descargar los que nos interesen.

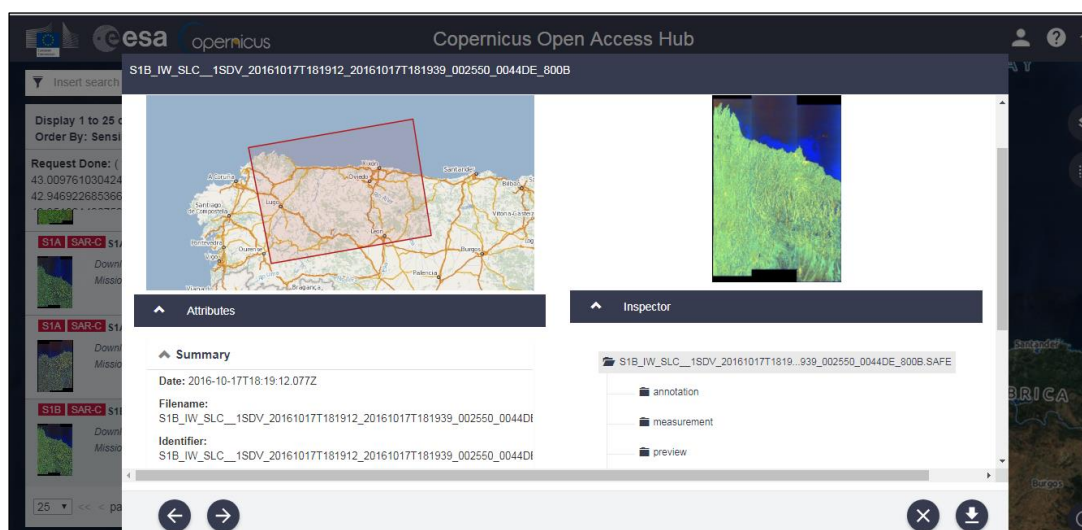


Figura 17: Pantalla de consulta de metadatos de las imágenes. Fuente: ESA

En la página de Alaska fijando una imagen como *Master* podemos comprobar la línea base perpendicular y la coherencia entre las dos imágenes, que son dos factores muy importantes que nos den una indicación de la calidad de los productos que vamos a obtener con la interferometría.

En las tres figuras siguientes se muestran las pantallas para la selección de las imágenes:

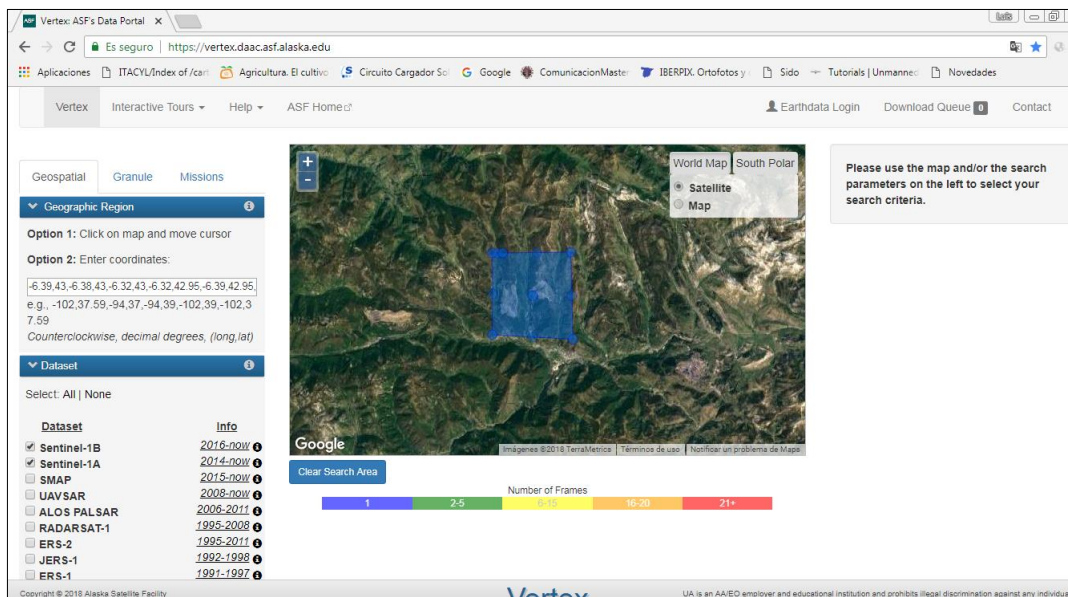


Figura 18: Criterios de selección de imágenes SAR. Fuente: Alaska

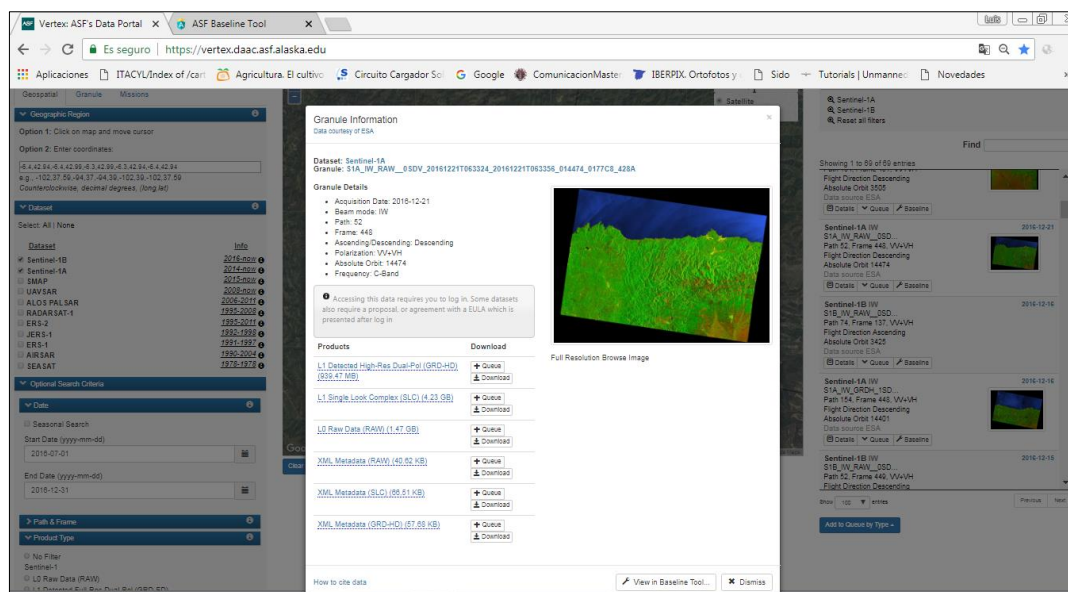
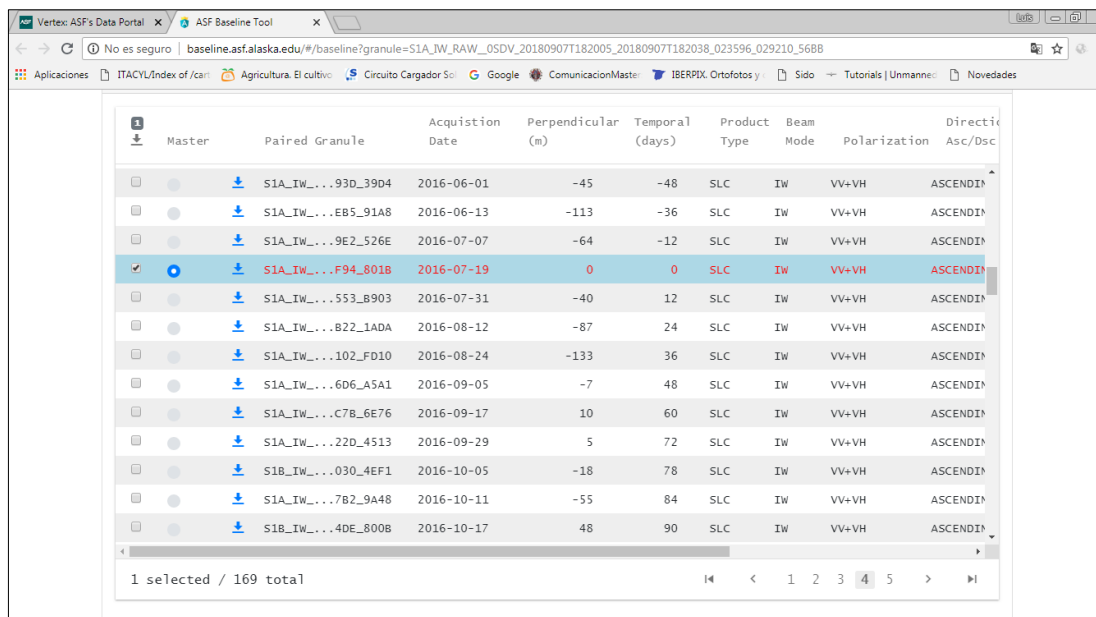


Figura 19: Consulta de metadatos de imágenes SAR. Fuente: Alaska



Master	Paired Granule	Acquisition Date	Perpendicular (m)	Temporal (days)	Product Type	Beam Mode	Polarization	Direction
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...93D_39D4	2016-06-01	-45	-48	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...EB5_91A8	2016-06-13	-113	-36	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...9E2_526E	2016-07-07	-64	-12	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input checked="" type="checkbox"/>	S1A_IW_...F94_8018	2016-07-19	0	0	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...553_8903	2016-07-31	-40	12	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...B22_1ADA	2016-08-12	-87	24	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...102_FD10	2016-08-24	-133	36	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...6D6_A5A1	2016-09-05	-7	48	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...C7B_6E76	2016-09-17	10	60	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...22D_4513	2016-09-29	5	72	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1B_IW_...030_4EF1	2016-10-05	-18	78	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1A_IW_...7B2_9A48	2016-10-11	-55	84	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING
<input type="checkbox"/>	S1B_IW_...4DE_800B	2016-10-17	48	90	SLC	IW	VV+VH	ASCENDING

Figura 20: Comprobación de parámetros de imágenes SAR. Fuente: Alaska

3.2. Proceso con software SNAP

3.2.1. Procesamiento de las imágenes

En los siguientes apartados se describen los procesos realizados con el programa SNAP, para obtener la deformación del terreno en la zona de estudio. Según la metodología los procesos a realizar son:

- Corregistro de las imágenes.
- Interferograma y eliminación de ráfagas.
- Filtrado de Fase Goldstein.
- Filtrado Multilooking.
- Exportación de Fase para realizar el desenvolvimiento con SNAPHU. Este proceso se realiza fuera de SNAP.
- Importación de Fase desenvuelta.
- Convertir Fase desplazamiento.
- Aplicar correcciones del terreno para georreferenciar.
- Exportar imágenes en formato kmz y Geotiff.

Abrir imágenes

Desde la opción de menú Abrir abrimos las dos imágenes para realizar el procesamiento. Tal como se explicó en la metodología se debe elegir dos imágenes de

fechas consecutivas para minimizar la decorrelación temporal. No es necesario descomprimir los archivos. La opción de abrir imágenes se muestra en la siguiente Figura:

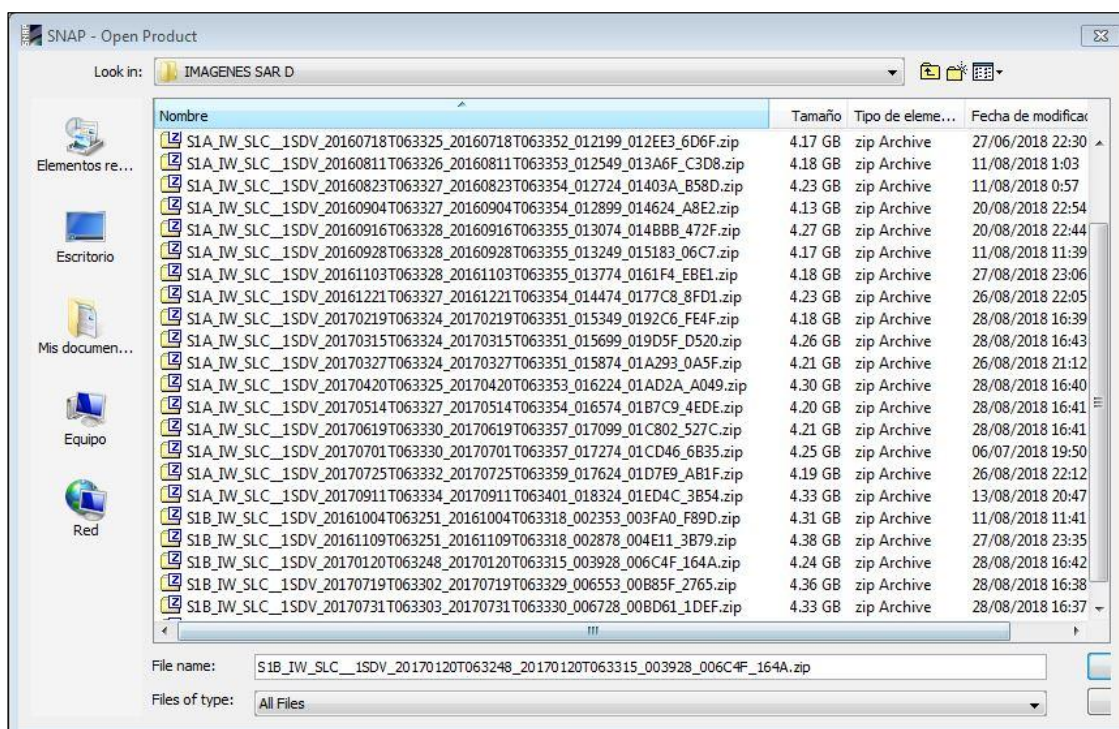


Figura 21: Apertura de imágenes.

Con la opción InSAR Stack, comprobamos los parámetros de Línea Base perpendicular, Base Temporal, Coherencia estimada y Altura de Ambigüedad. Los parámetros de las imágenes utilizadas en el trabajo se relacionan en la Tabla 7.



Fecha	Base Perp.	Base Temp.	Coherencia	H. Ambigüedad
18-jul-2016	-19.88	-36	0.95	772.64
23-ago-2016				
23-ago-2016	-15.69	-12	0.98	978.87
4-sep-2016				
4-sep-2016	62.55	-30	0.92	-245.53
4-oct-2016				
4-oct-2016	13.69	-30	0.96	-1121.19
3-nov-2016				
3-nov-2016	-60.96	-36	0.92	251.92
9-dic-2016				
9-dic-2016	-53.73	-42	0.92	285.83
20-ene-2017				
20-ene-2017	3.15	-30	0.97	-4877.09
19-feb-2017				
19-feb-2017	93.86	-24	0.90	-163.63
15-mar-2017				
15-mar-2017	-69.73	-36	0.91	220.26
20-abr-2017				
20-abr-2017	75.68	-24	0.91	-202.94
14-may-2017				
14-may-2017	-56.74	-36	0.92	270.70
19-jun-2017				
19-jun-2017	-4.26	-30	0.97	3610.21
19-jul-2017				

Tabla 7: Parámetros de los pares interferométricos.

Corregistro, Interferograma y eliminación de ráfagas

El programa SNAP tiene la posibilidad, mediante la utilidad Graph Builder, de concatenar varios procesos, con lo cual una vez configurados se ejecutarían uno tras otro en el orden indicado en el gráfico, es una opción muy útil cuando los procesos tardan varios minutos en ejecutarse cada uno.

En las siguientes figuras se muestra la configuración para ejecutar los procesos del gráfico TOPSAR Correg Interferograma que se utiliza para realizar el Corregistro, Interferograma y eliminación de ráfagas.

En las distintas ventanas de configuración aparecen los valores de configuración por defecto, normalmente se obtienen los mejores resultados, pero puede haber situaciones en las que se pueden cambiar y probar el procesado con las otras posibilidades de configuración que ofrece el programa.

En Read y Read(2) se asignan las imágenes Maestra y Esclava.

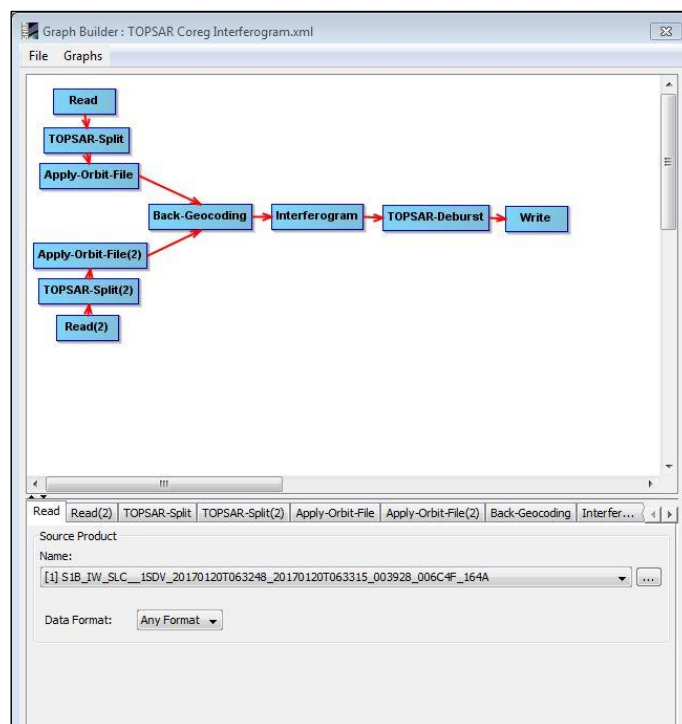


Figura 22. Asignación de imágenes maestra y esclava.

En las pestañas TOPSAR Split se elige la subfranja y la polarización que se van a tratar en el proceso, deben ser las mismas en las dos imágenes.

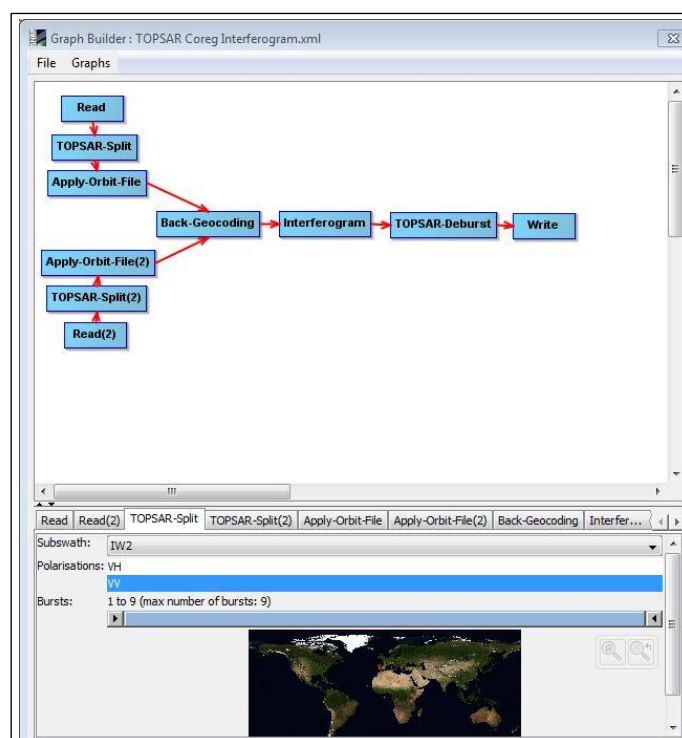


Figura 23: Indicar Subfranja y polarización.

En las pestañas Apply-Orbit-File se indica los datos precisos de las órbitas de los satélites, se descargan automáticamente de Internet.

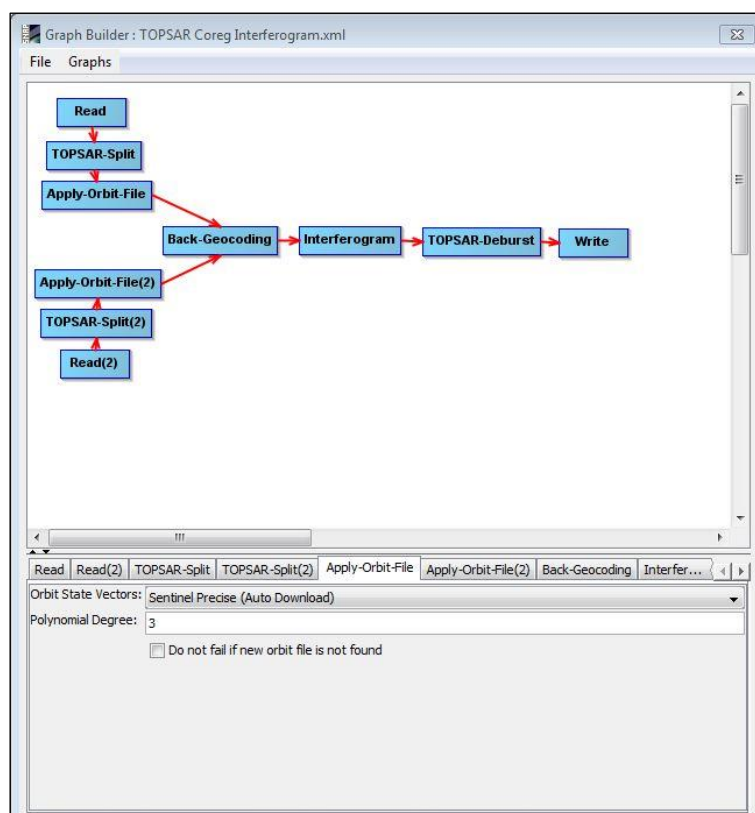


Figura 24: Datos de las órbitas de los satélites.

En la pestaña Back Geocoding, se indica el MDE y los métodos de remuestreo para realizar el corrección de las imágenes.

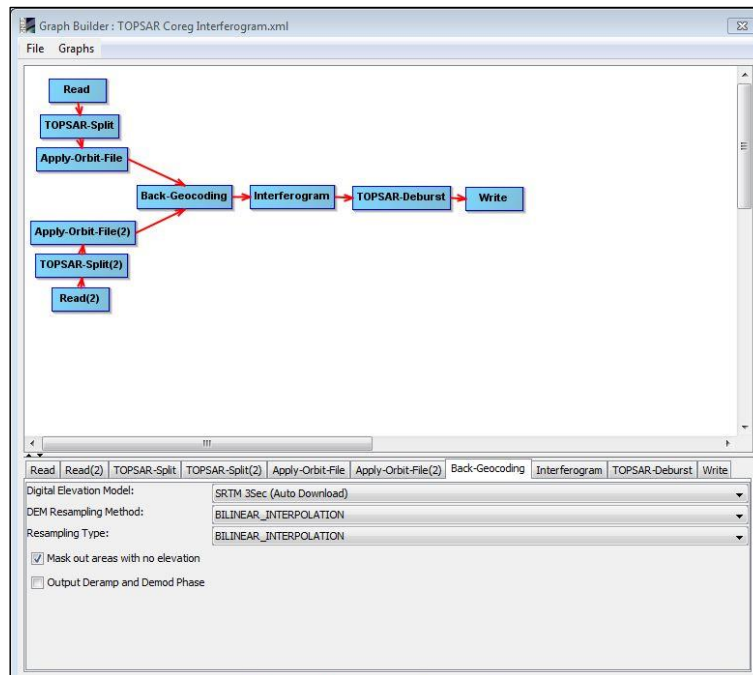


Figura 25: Configuración Corregistro.

Configuramos que realice el interferograma y aplique la corrección por la curvatura de la Tierra y que calcule la coherencia estimada.

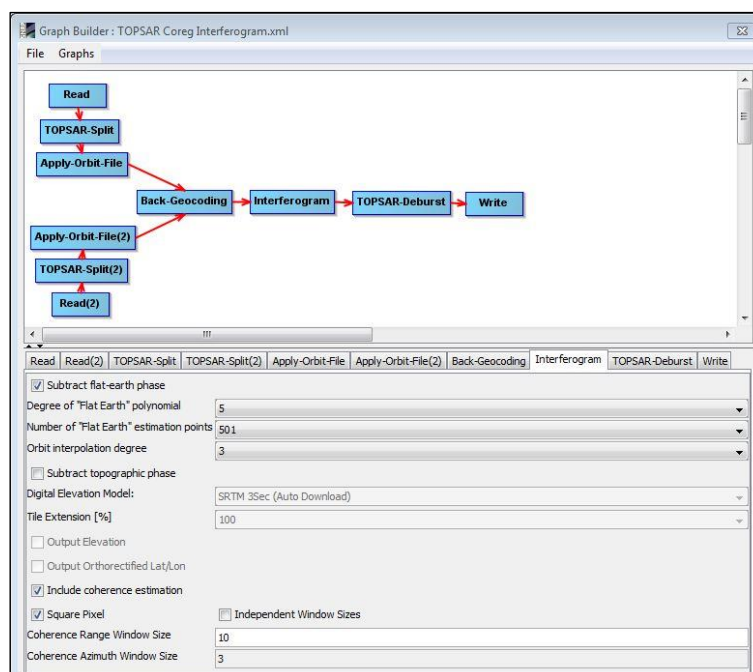


Figura 26: Configuración Interferograma.

En la pestaña **TOPSAR-Deburst**, no necesita configuración y elimina las líneas entre ráfagas.

En la última pestaña **Write** le indicamos el formato y el nombre del archivo en el que nos va a generar los datos tratados y la carpeta donde los va a almacenar.

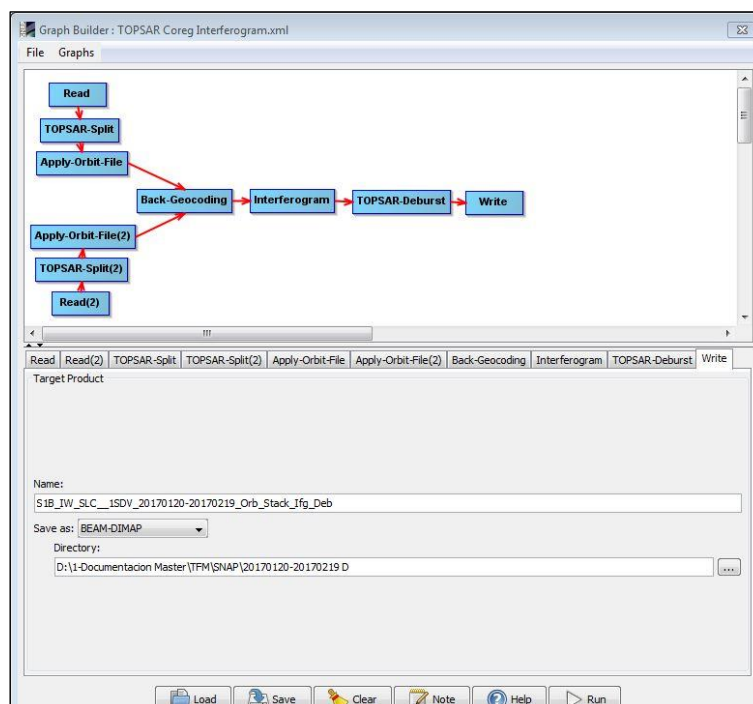


Figura 27: Almacenamiento de los datos generados.

Con los procesos ejecutados ya disponemos del interferograma realizado con las dos imágenes tratadas.

Recorte de la Zona de trabajo (Subset)

La zona abarcada por una subfranja, o la unión de varias si son necesarias es muy amplia, si nuestra zona de estudio es más pequeña podemos efectuar el recorte de la imagen y trabajar con la zona recortada, con lo cual los procesos reducirán el tiempo de ejecución, sobre todo el desenvolvimiento de la fase con SNAPHU.

En las Figuras 28 y 29 se muestra el proceso de creación de un recorte para ajustar la imagen a la zona de trabajo.

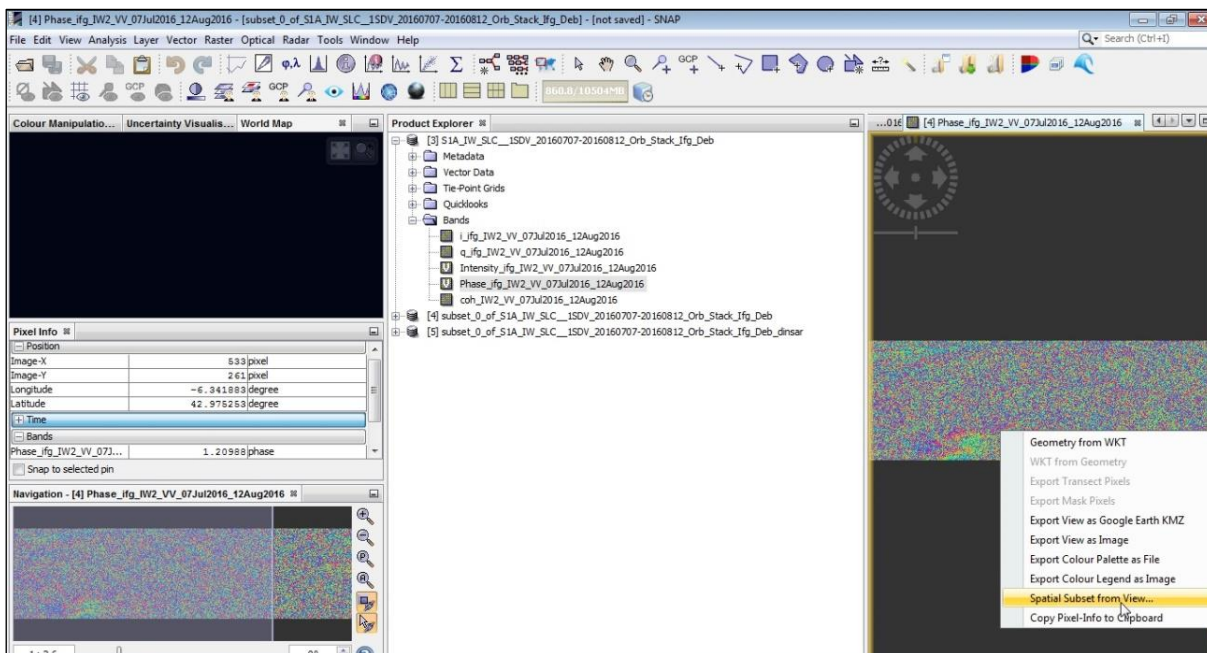


Figura 28: Creación de una zona de trabajo.

Tal como se muestra en la Figura 29 se ofrecen varias alternativas para señalar la zona de recorte, se puede indicar por pixeles de la imagen, coordenadas geográficas o la vista visualizada en pantalla.

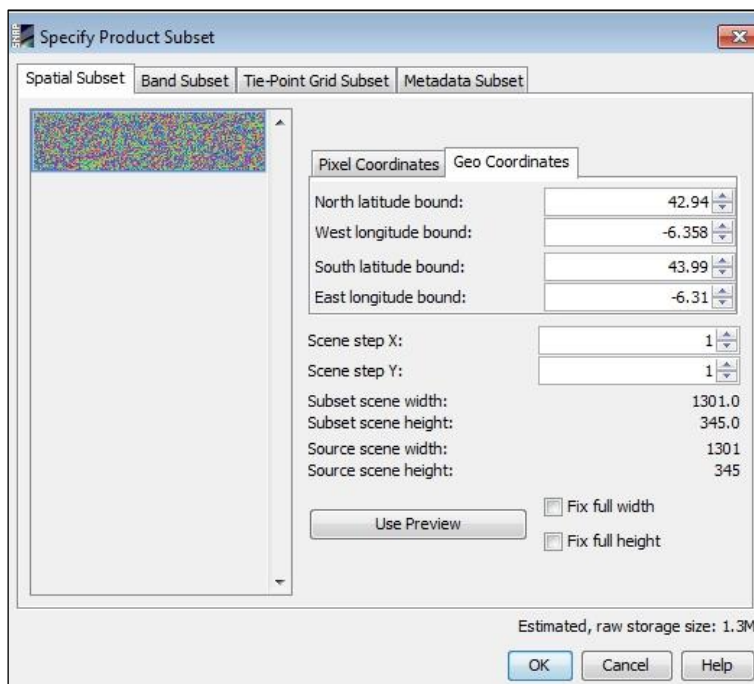


Figura 29: Recorte zona de trabajo.

Interferograma Diferencial. Remoción fase topográfica

Una vez realizadas las operaciones anteriores, creamos el interferograma diferencial mediante la sustracción de la topografía de la zona, para ello seleccionamos la opción que se muestra en la siguiente Figura.

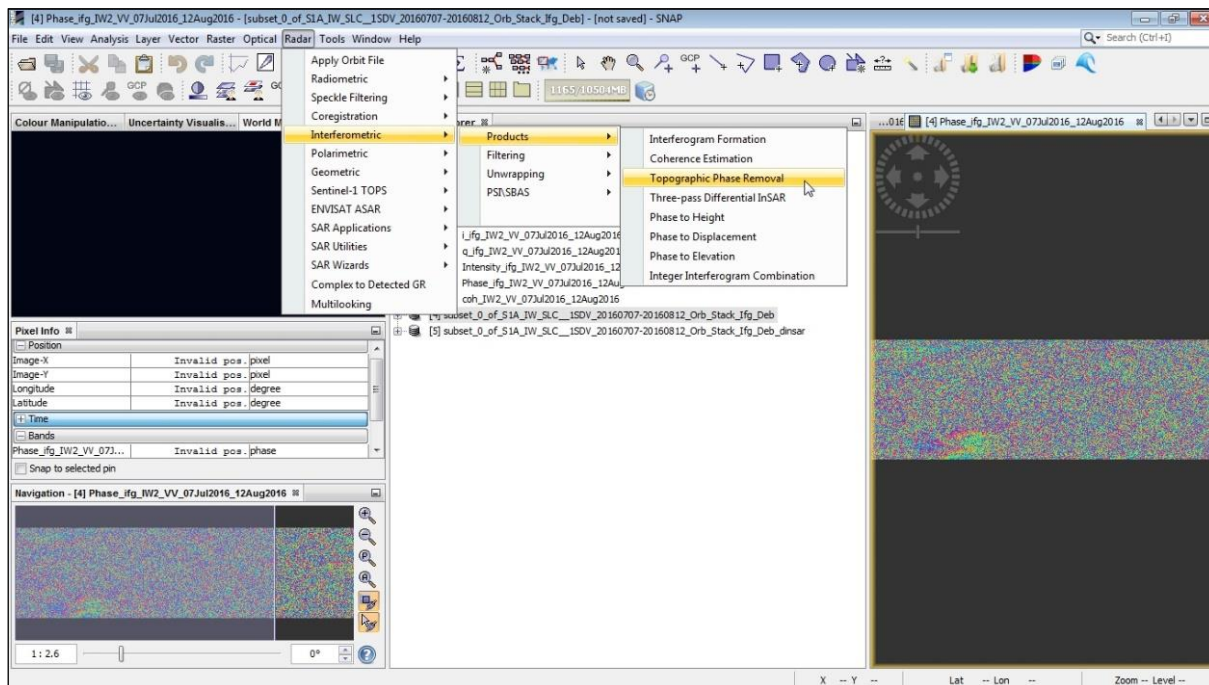


Figura 30: Interferograma Diferencial. Remoción fase topográfica.

Seleccionamos el MDE y dejamos el resto de las opciones con la configuración por defecto.

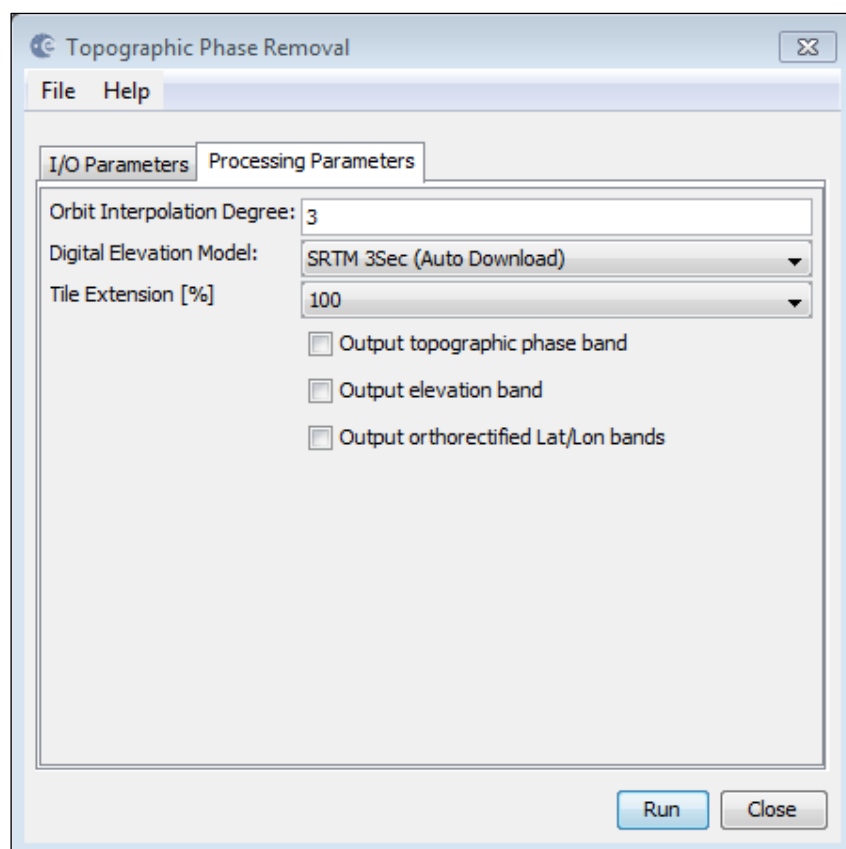


Figura 31: Configuración. Remoción fase topográfica.

Filtro de Fase de Goldstein

El siguiente paso el filtrado aplicando el filtro de fase Goldstein y el filtro Multilook.

En la primera pestaña I/O Parameters, al igual que en las anteriores se indica el archivo de entrada y los datos de salida.

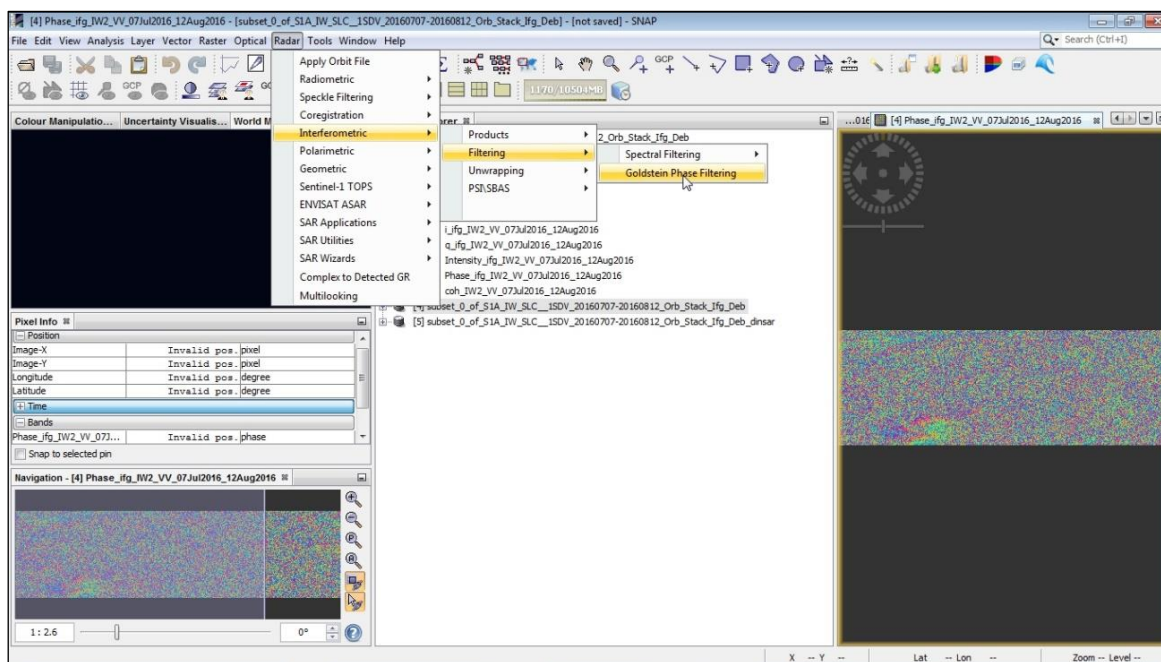


Figura 32: Filtro de Fase Goldstein.

Aplicamos el filtro con los parámetros por defecto.

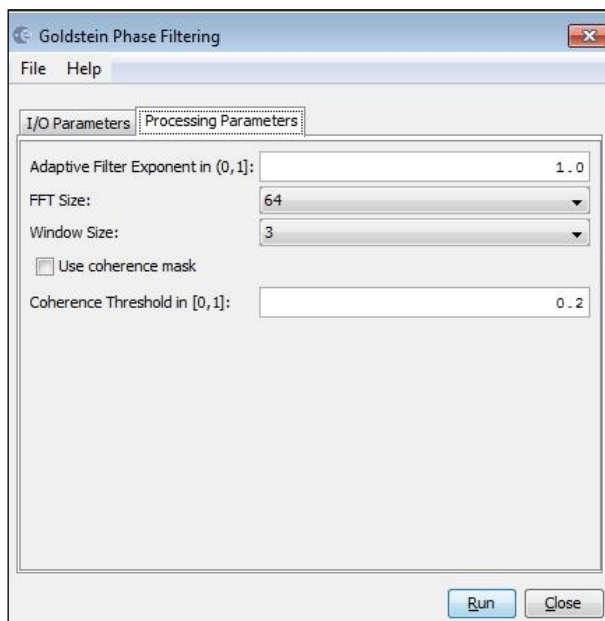


Figura 33: Configuración Filtro de Goldstein.

Filtro Multilooking

Con la aplicación del Filtro Multilooking, conseguiremos eliminar más ruido en los valores de fase de la imagen.

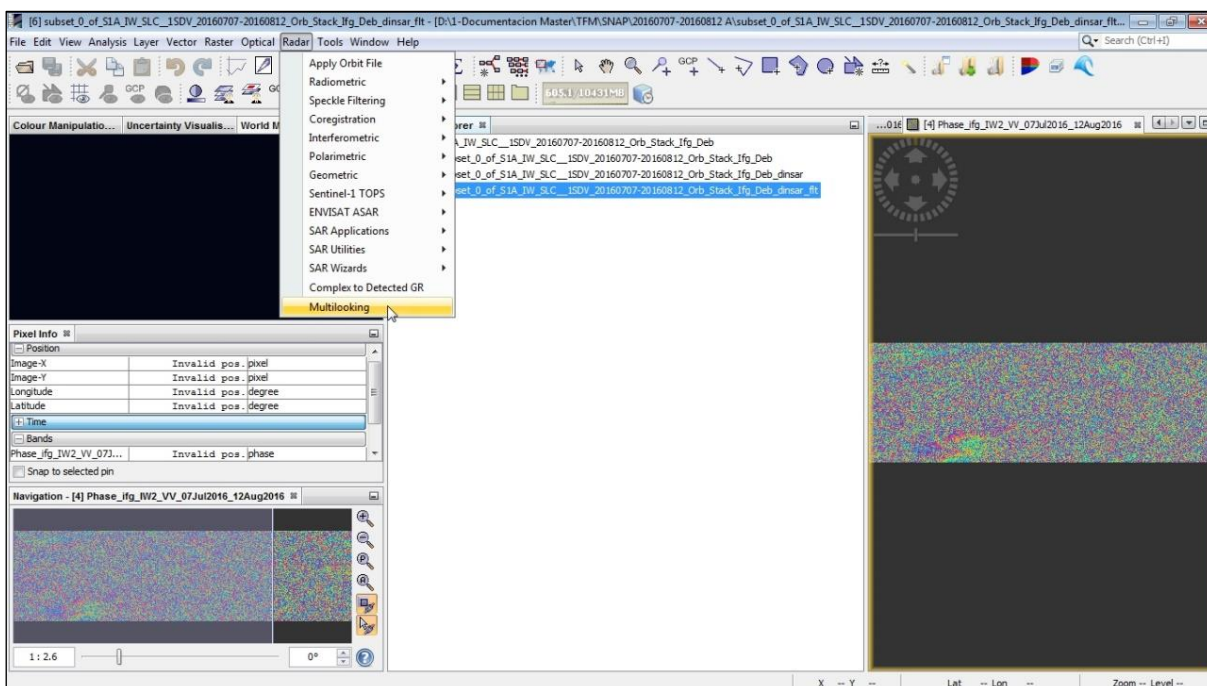


Figura 34: Filtro Multilooking.

No aplicamos el filtro a las bandas de intensidad y fase, ya que, como hemos visto en la revisión de la teoría las bandas de intensidad y fase se generan a partir de los valores real e imaginario del número complejo que forma la señal.

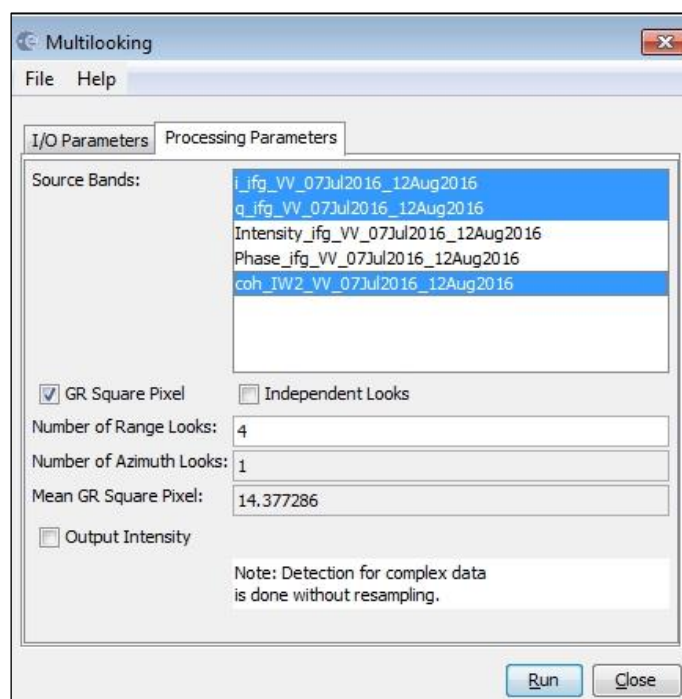


Figura 35: Parámetros Filtro Multilooking.

En el número de Looks u observaciones se le indica el número de píxeles, en cada sentido, para hacer la media y adjudicar el nuevo valor al píxel.

Una vez aplicando el filtro necesitamos crear la fase con *i* y *q* filtradas, para ello marcamos sobre una banda y ejecutamos la opción que muestra en la siguiente figura.

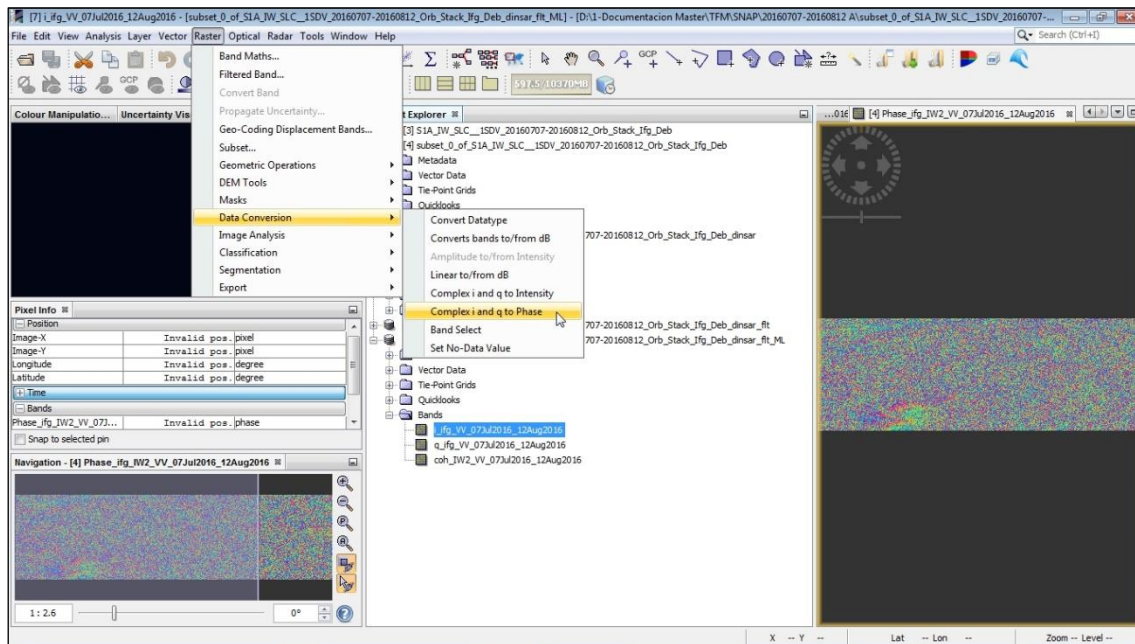


Figura 36: Creación de banda de Fase.

Exportación de datos para SNAPHU

Una vez obtenida la diferencia de fase y realizadas las operaciones de filtrado necesitamos desenvolver la fase, este proceso que no lo realiza SNAP, sino que tenemos que realizarlo con un programa externo.

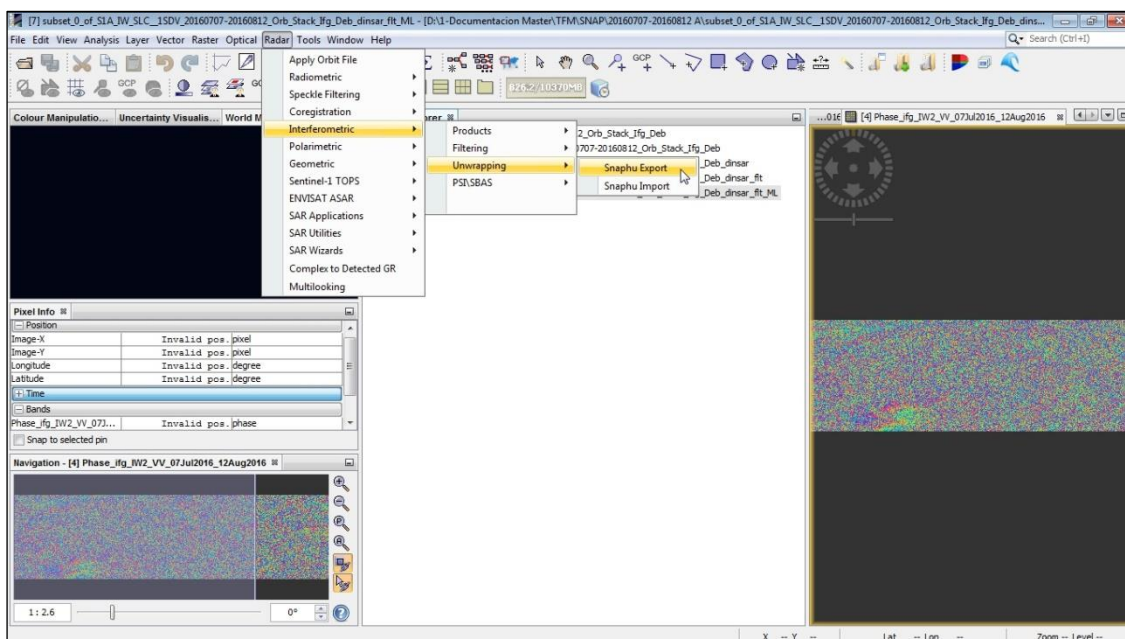


Figura 37: Exportación de datos para desenvolvimiento de la fase.

Con la opción que se muestra en la Figura el programa genera los datos necesarios para realizar el desenvolvimiento de la fase con SNAPHU.

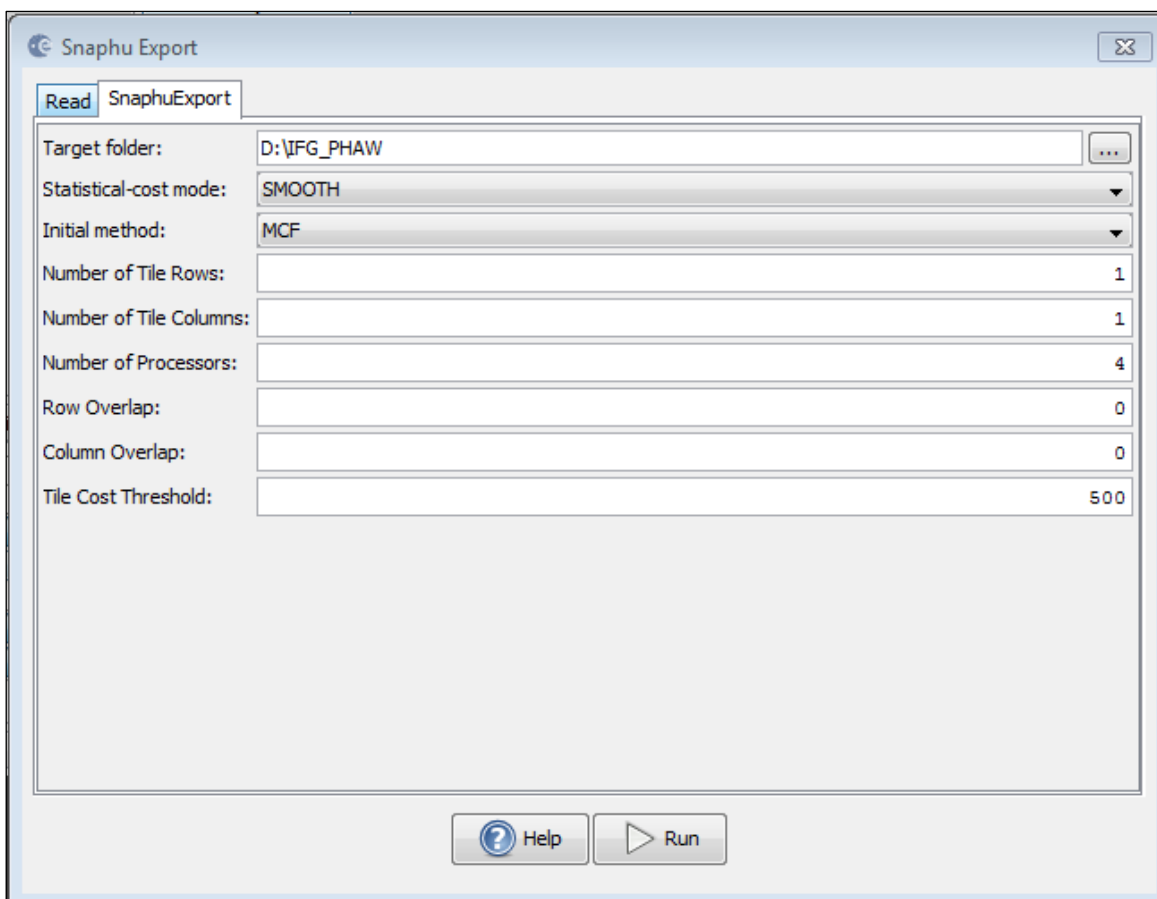


Figura 38: Configuración para exportación de datos para desenvolvimiento de la fase.

Importación Fase desenvuelta

Efectuamos la importación de la fase desenvuelta ejecutando la opción prestada.

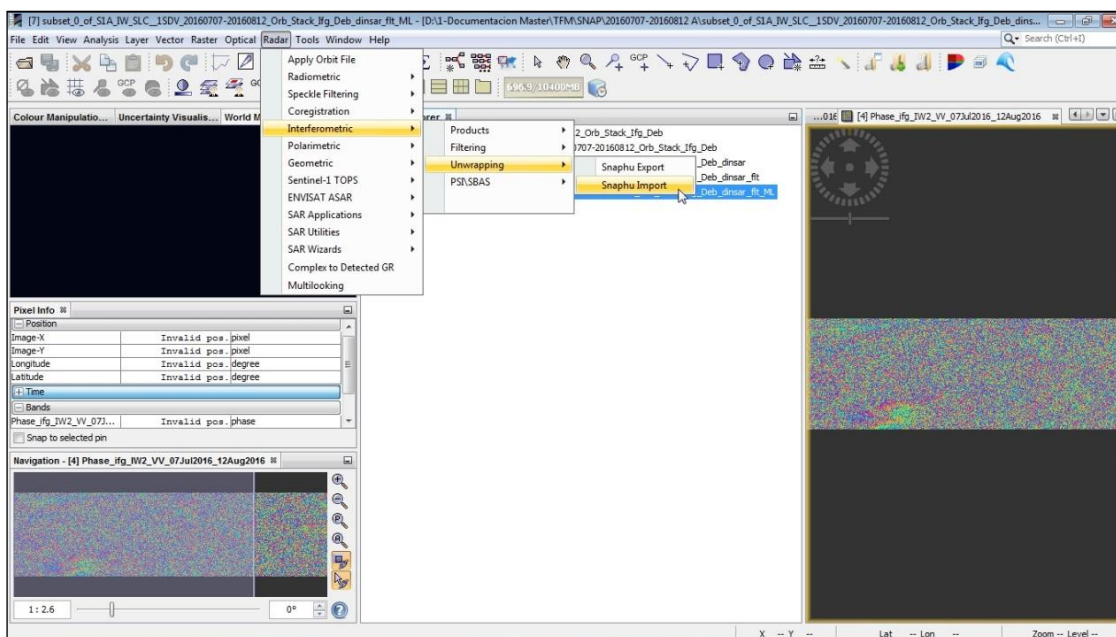


Figura 39: Importación fase desenvuelta.

En la pestaña 1 elegimos el archivo de datos que se empleó para exportar datos para realizar el desenvolvimiento de la fase.

En la pestaña que se muestra se elige el archivo con la fase desenvuelta.

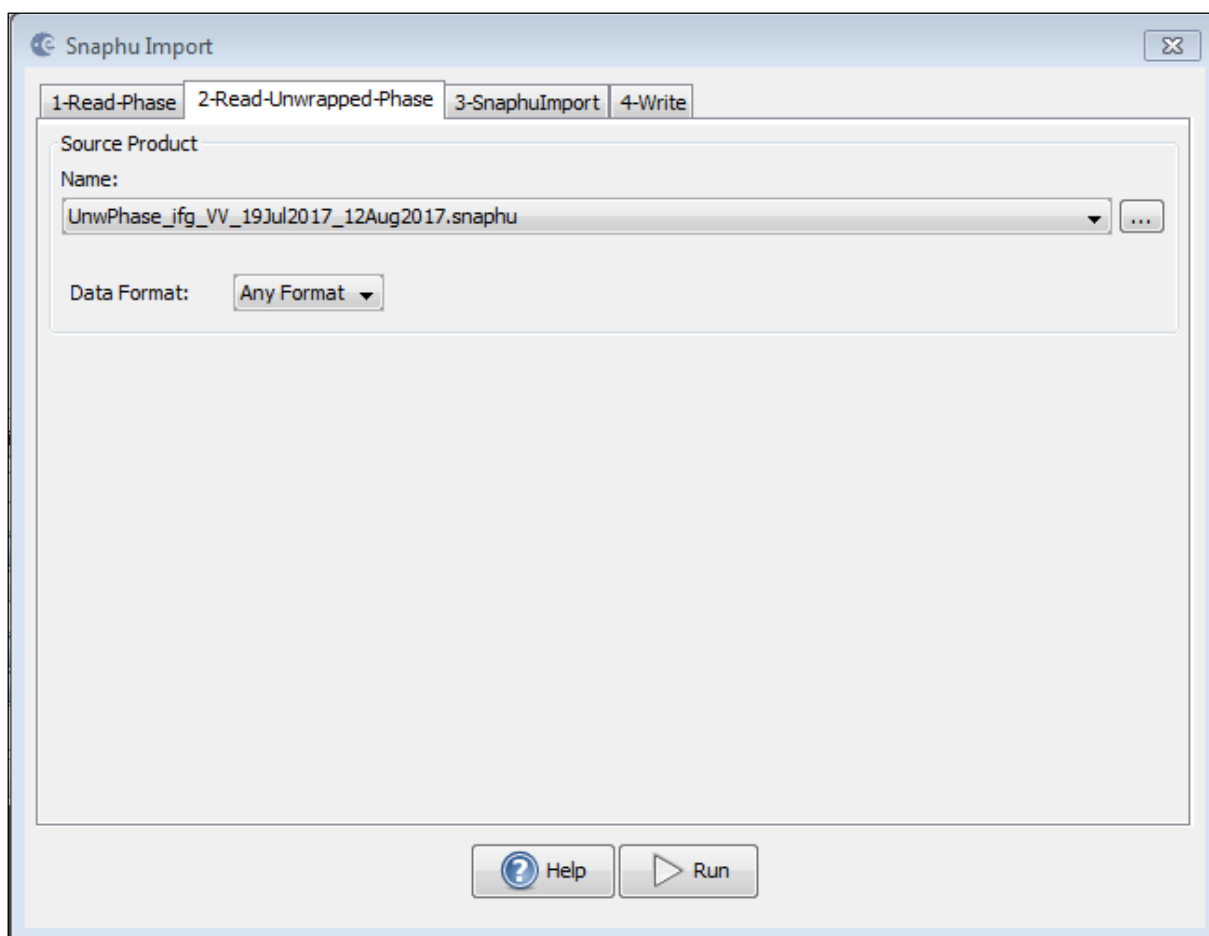


Figura 40: Configuración importación fase desenvuelta.

Fase a desplazamiento

Con el valor de la fase real, al haber efectuado el proceso de desenvolvimiento de fase y haberlo importado de nuevo a SNAP, ya podemos calcular el valor del desplazamiento en cada pixel de la imagen, este proceso no necesita ninguna configuración.

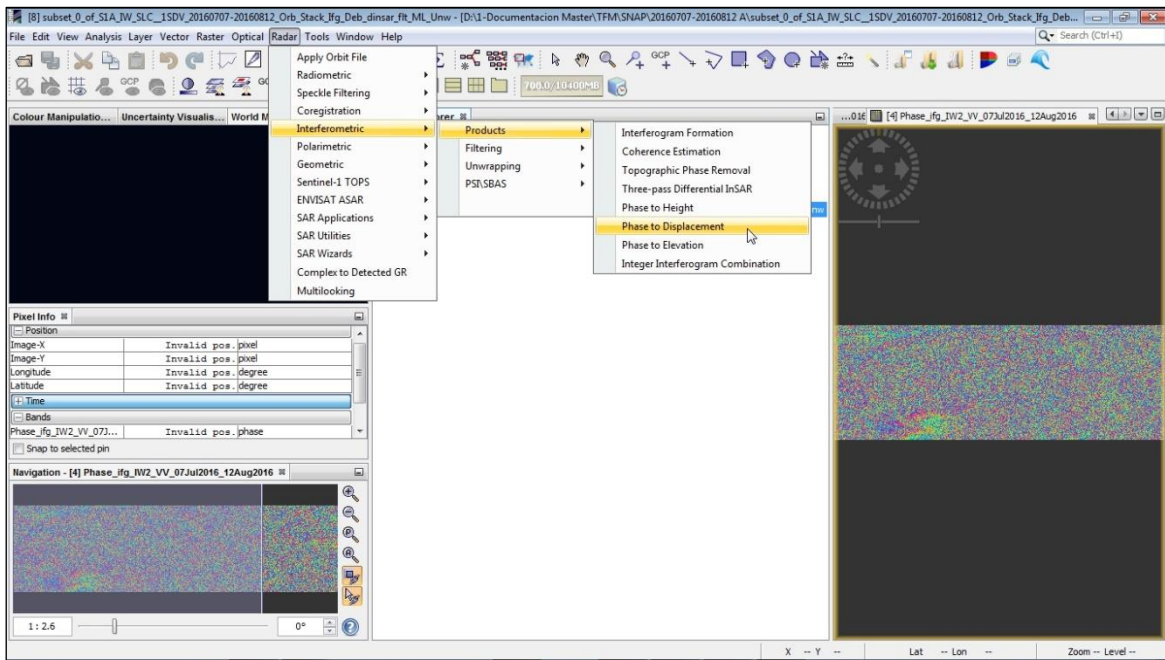


Figura 41: Fase a Desplazamiento.

Geocodificación

Ya se han realizado todos los procesos, para obtener el valor del desplazamiento del terreno con el procesamiento de imágenes SAR, con el proceso de geocodificación transformamos las coordenadas a un sistema cartográfico para integrarlo junto con otros datos.

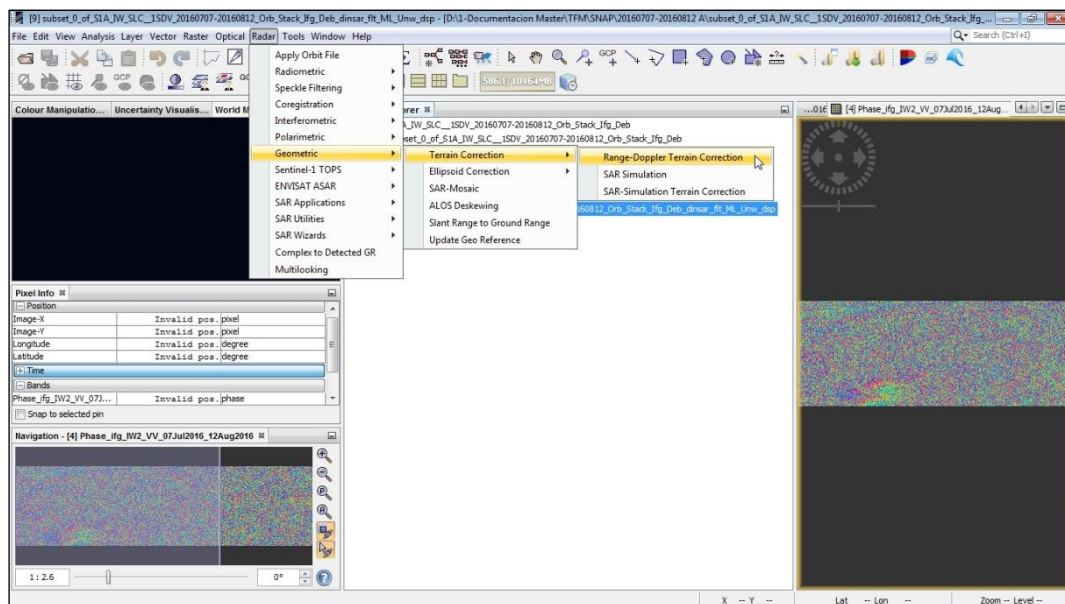


Figura 42: Geocodificación.

En la ventana de configuración marcamos las bandas que deseamos transformar, el modelo digital de elevación a utilizar y el sistema de coordenadas de destino, el resto de opciones las dejamos como vienen por defecto.

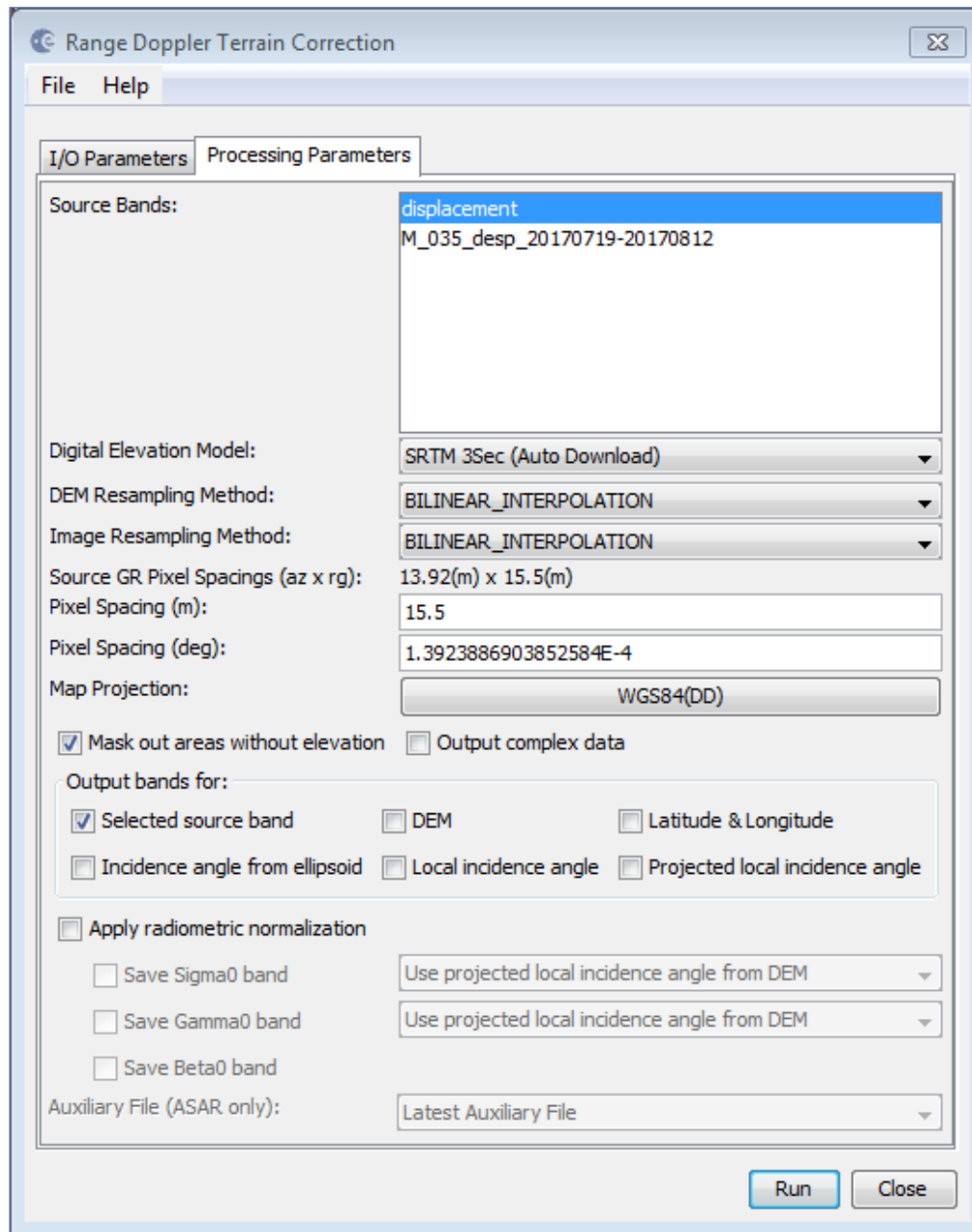


Figura 43: Configuración Geocodificación.

Exportación de datos

Con los datos ya geolocalizados podemos efectuar la exportación de los datos para presentar en mapas, visualizarlos, etc. Desde la ventana de visualización tenemos varias opciones de exportación, tal como se muestra en la Figura siguiente

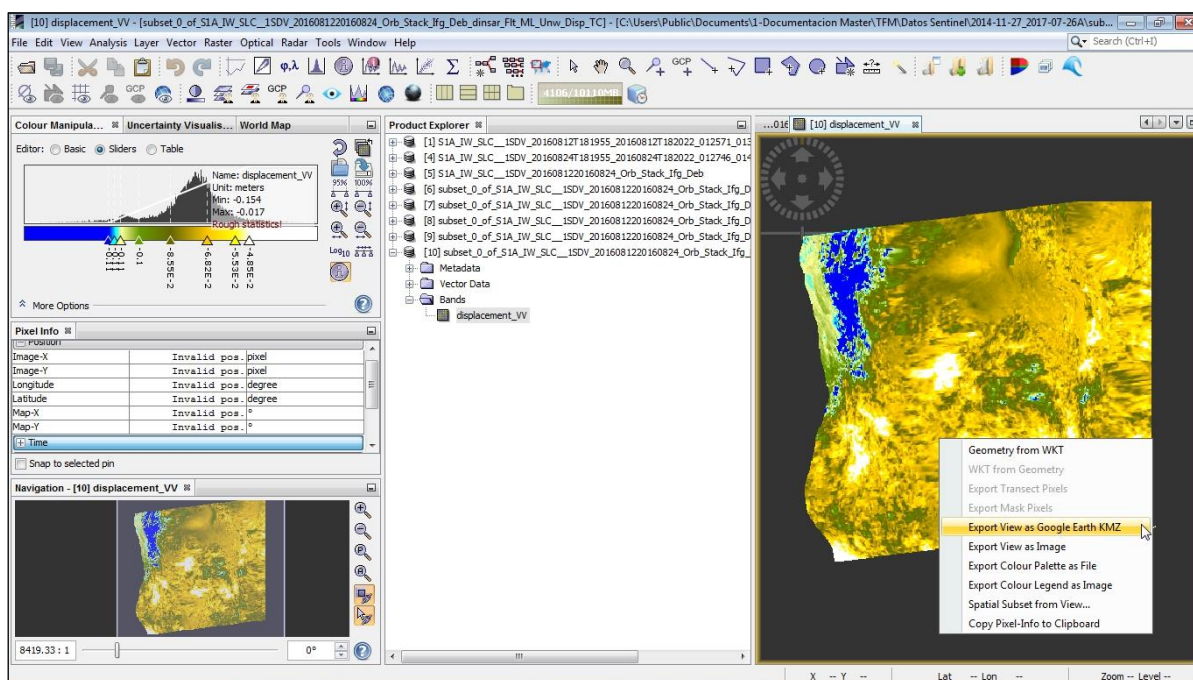


Figura 44: Exportación desde ventana de visualización.

En la opción de menú **File > Export** tenemos disponibles todas las opciones de exportación de datos.

3.3. Proceso con software SNAPHU

Para el desenvolvimiento de la fase presente en la imagen del interferograma, generado mediante el procesamiento de las imágenes SAR con el programa SNAP, necesitamos ejecutar un programa externo, ya que éste proceso no se encuentra implementado en el programa SNAP.

Para efectuar el desenvolvimiento de la fase, en este trabajo, utilizamos el algoritmo SNAPHU, tal como se describía en el punto 2.2.4.

Actualmente ya se encuentra disponible el algoritmo para ejecutarlo en Windows desde la ventana **Símbolo del Sistema** en **Inicio -> Programas -> Accesorios**.

El instalador para Windows se puede encontrar en el enlace de la página de ESA http://step.esa.int/thirdparties/snaphu/1.4.2-2/snaphu-v1.4.2_win64.zip

El desenvolvimiento de la fase se realiza mediante la ejecución del programa descargado del enlace anterior, instalado en Windows.

Los pasos a seguir para la instalación del programa y realizar el proceso del desenvolvimiento de fase en los interferogramas generados se presentan en los apartados siguientes:

Descarga e instalación del programa

En el enlace citado descargamos el programa que está contenido en un archivo comprimido, creamos en la unidad C: o D:, una carpeta con el nombre SNAPHU y extraemos en ella el archivo comprimido descargado, con lo que nos quedaría la carpeta con la estructura mostrada en la Figura 45.

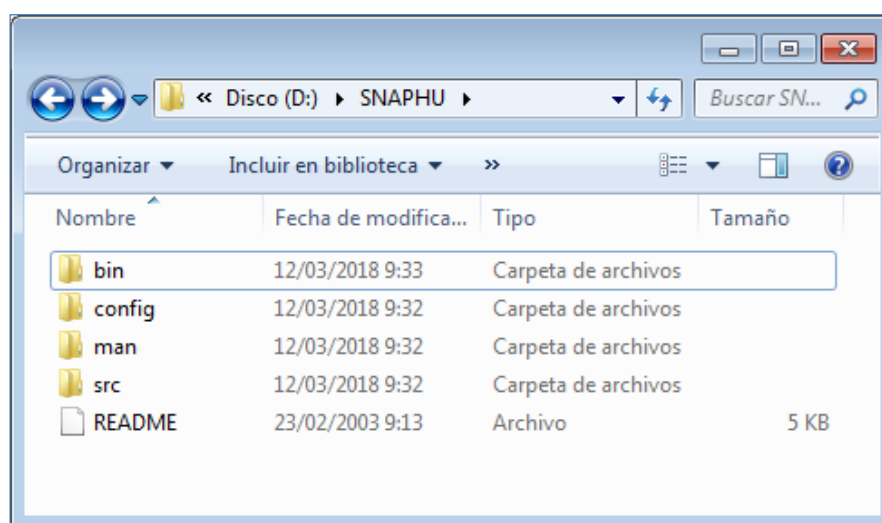


Figura 45: Instalación de SNAPHU.

En la carpeta **bin**, se encuentra el ejecutable snaphu.exe que ha de ejecutarse desde la ventana de **Símbolo del Sistema**.

Ejecución del programa

Para el desenvolvimiento de fase de los interferogramas hemos de aplicar el programa al conjunto de datos que exportamos desde el programa SNAP, estos datos se encuentran en una carpeta generada en el directorio que indicamos en el programa al realizar la exportación para SNAPHU, Figura 46.

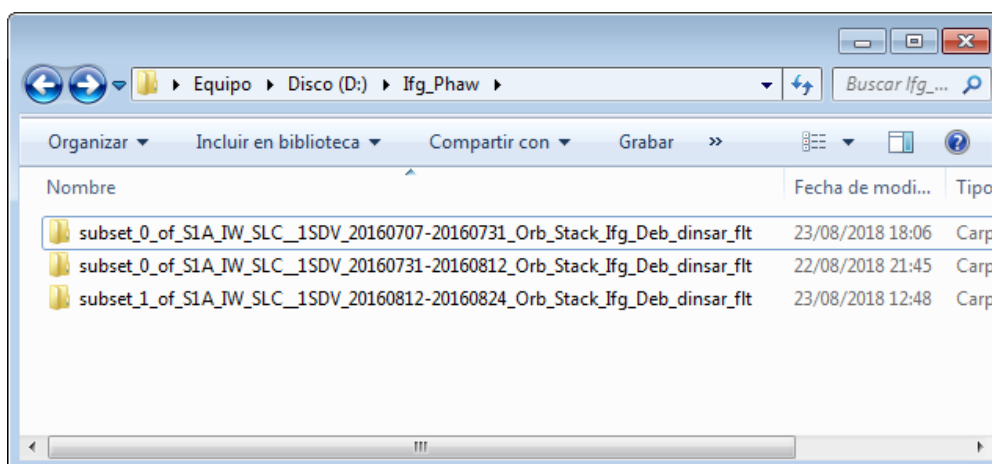


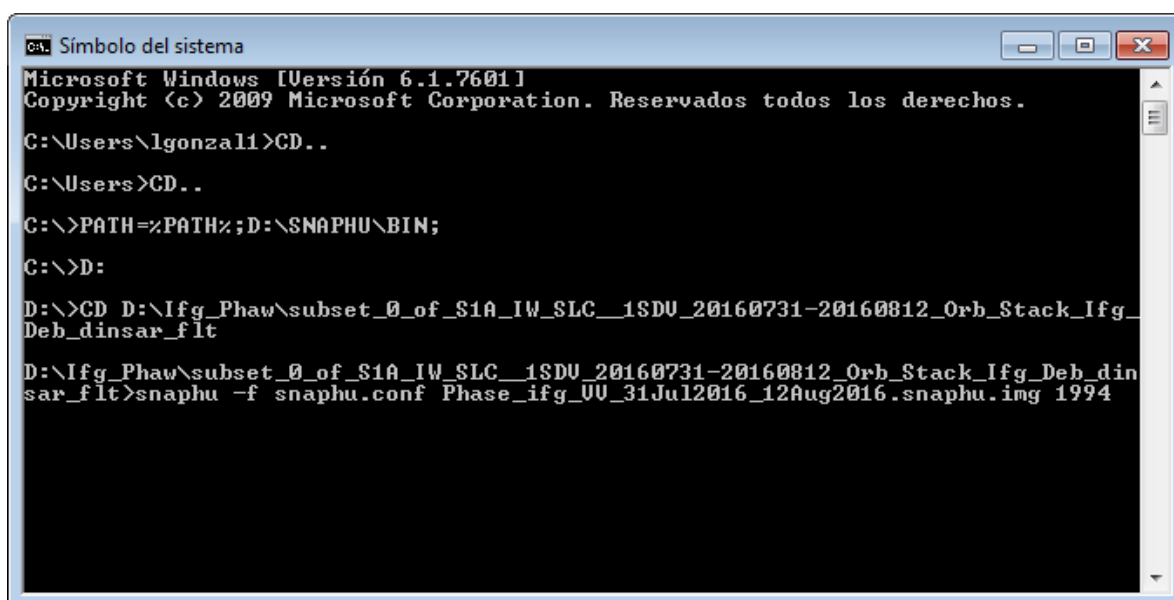
Figura 46: Estructura de directorios de exportación a SNAPHU.

Para ejecutar el algoritmo abrimos la ventana de Símbolo del Sistema con **Inicio > Programas > Accesorios > Símbolo del Sistema**, para ejecutar SNAPHU, tal como se ve en la siguiente Figura



Figura 47: Inicio de la aplicación **Símbolo del Sistema**.

En la siguiente figura se muestra la ventana con las órdenes necesarias para la ejecución del algoritmo.

A screenshot of the Windows Command Prompt window titled 'Símbolo del sistema'. The window shows the following commands and their output:

```
Microsoft Windows [Versión 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

C:\Users\lgonzal1>CD..
C:\Users>CD..
C:\>PATH=%PATH%;D:\SNAPHU\BIN;
C:\>D:
D:\>CD D:\Ifg_Phaw\subset_0_of_S1A_IW_SLC__1SDU_20160731-20160812_Orb_Stack_Ifg_Deb_dinsarflt
D:\Ifg_Phaw\subset_0_of_S1A_IW_SLC__1SDU_20160731-20160812_Orb_Stack_Ifg_Deb_dinsarflt>snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_UU_31Jul2016_12Aug2016.snaphu.img 1994
```

Figura 48: Ventana de **Símbolo del Sistema**, con las órdenes para ejecutar el proceso.

Con las dos primeras órdenes **CD..**, nos situamos en el directorio raíz **C:**, después de cada orden pulsamos **ENTER** para ejecutarla.

El programa hemos de ejecutarlo en la carpeta que tenemos los datos con la fase envuelta y el archivo de coherencia, para ello con la orden **PATH=%PATH%;D:\SNAPHU\BIN;** indicamos que, además de las carpetas para buscar archivos ejecutables que están definidas en el sistema (%PATH%), incluya la carpeta donde tenemos el archivo **snaphu.exe** para poder ejecutarlo desde la carpeta de los datos.

Cambiamos a **D:** y con **CD D:\lfg_Phaw\subset_0_of_S1A_IW_SLC__1SDV_20160731-20160812_Orb_Stack_lfg_Deb_DinSARflt** accedemos a la carpeta que contiene los datos, para escribir la dirección de la carpeta podemos copiarla de la barra de direcciones y pegarla en la ventana **Símbolo del Sistema**, como se muestra en la siguiente figura:

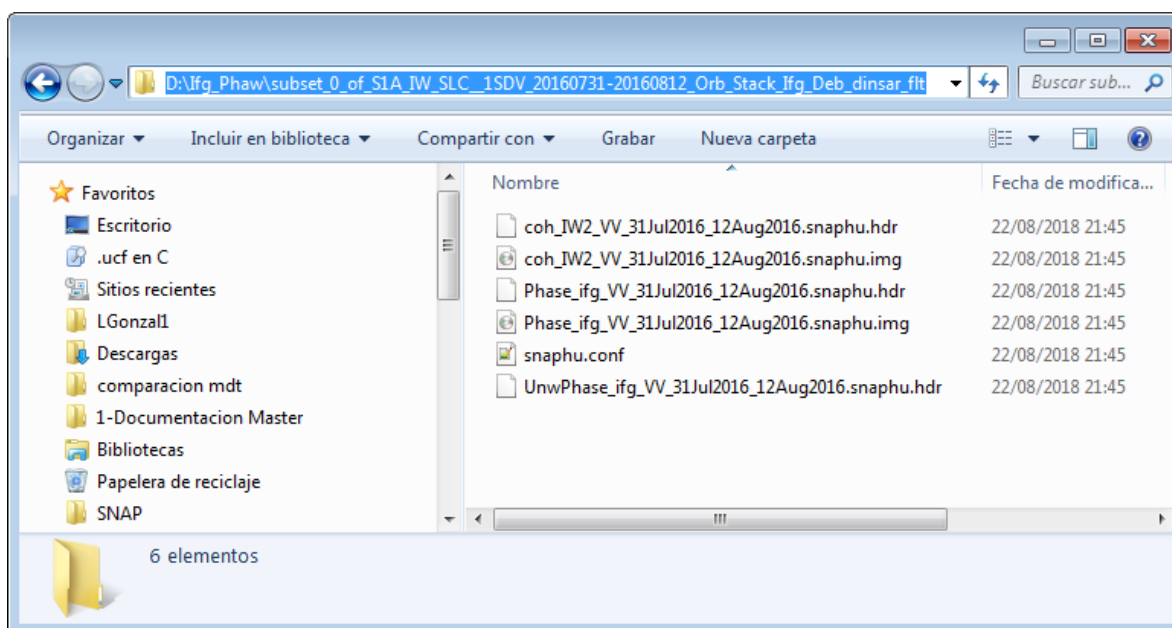
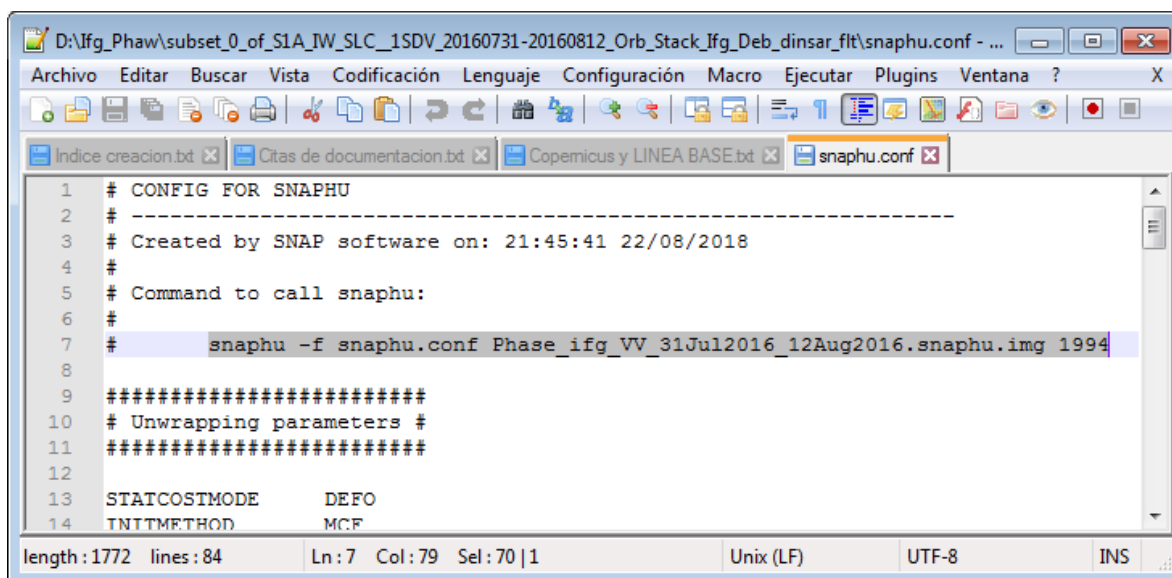


Figura 49: Copia de la dirección de la carpeta de datos.

Entre los archivos de la carpeta se encuentra el archivo **snaphu.conf**, el cual contiene en una línea la orden con los parámetros para ejecutar el algoritmo y efectuar el desenvolvimiento de la fase, editamos el archivo con un editor de texto y pegamos la



línea en la ventana para ejecutar el proceso, en la siguiente figura vemos la línea indicada.



```
1 # CONFIG FOR SNAPHU
2 # -----
3 # Created by SNAP software on: 21:45:41 22/08/2018
4 #
5 # Command to call snaphu:
6 #
7 # snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_VV_31Jul2016_12Aug2016.snaphu.img 1994
8 #
9 #####
10 # Unwrapping parameters #
11 #####
12
13 STATCOSTMODE      DEFO
14 TNITMETHOD        MCF
```

length: 1772 lines: 84 Ln: 7 Col: 79 Sel: 70 | 1 Unix (LF) UTF-8 INS

Figura 50: Parámetros de ejecución de SNAPHU, en el fichero **snaphu.conf**.

Una vez ejecutado el proceso en la misma carpeta nos crea un archivo **UnwPhase** con la extensión **.img**, que contiene la fase desenvuelta y que será el que importemos desde SNAP para seguir con el procesamiento.



4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Desplazamiento medido mediante técnica DinSAR

Con el procesamiento de las imágenes con el software SNAP y la ejecución del algoritmo SNAPHU, se ha obtenido las medidas del desplazamiento en toda la zona que recortamos para procesar. Muchas de estas medidas realizadas por el SAR no son válidas, ya que se ven influenciadas por varios factores, lo que hace que tengan una baja coherencia.

Para cuantificar el desplazamiento en la zona, se ha procedido a procesar las imágenes de dos en dos para realizar el Interferograma Diferencial, para después medir el desplazamiento entre las dos fechas de las imágenes, la imagen de un mes es común para el Interferograma del mes anterior y el siguiente.

Con los desplazamientos medidos en cada mes y utilizando la opción del programa.

Radar > Corregistration > Stacks Tools > Create Stack

Creamos una pila con los datos que contienen los desplazamientos georreferenciados, con esto alineamos todos los mapas de desplazamiento y crea un archivo de datos con los datos de todos los meses.

Una vez alineados, podemos con la utilidad de Matemáticas de banda, sumar los desplazamientos para obtener el desplazamiento acumulado en cada mes.

Se analiza únicamente la zona en la que se ha producido la subsidencia que queremos medir.

En el programa SNAP, podemos ver las medidas del desplazamiento codificados por colores. Con los guiones de exportación de datos tenemos más posibilidades de análisis de los resultados.

El programa SNAP tiene la posibilidad de exportar desde la ventana de visualización como Google Earth **kmz**, además la leyenda de colores que refleja el desplazamiento.

El resultado lo podemos ver en la figura siguiente:

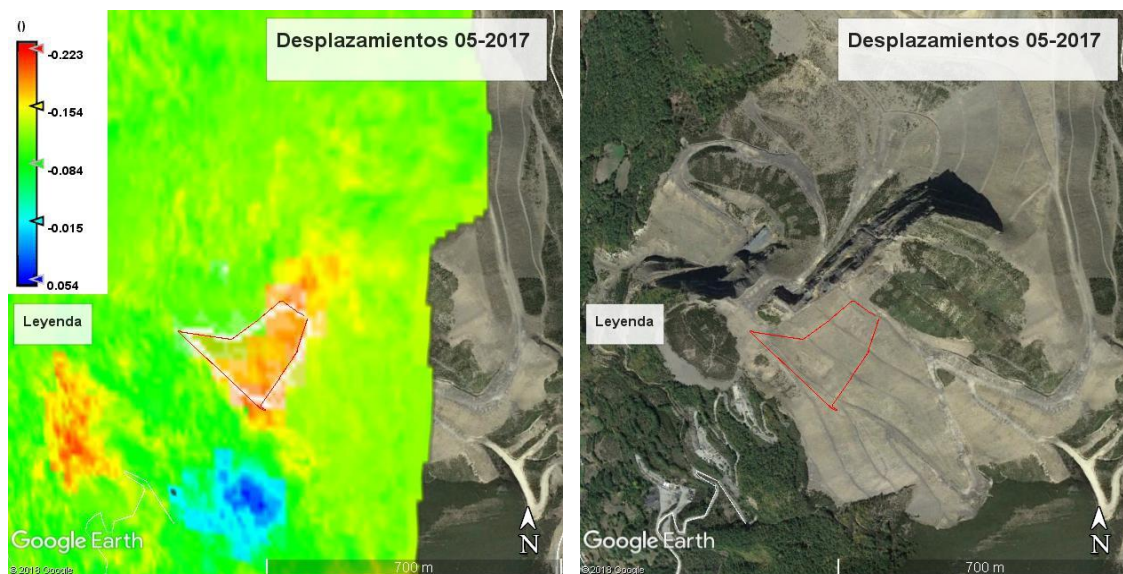


Figura 51: Mapa de desplazamiento sobre Google Earth.

Las imágenes exportadas en **kmz** nos permiten un rápido análisis visual de los resultados.

En la figura podemos ver los desplazamientos acumulados a mes de julio de 2017, analizando las dos imágenes, podemos ver que según la leyenda de desplazamiento, los de mayor cuantía se corresponde con la zona de subsidencia que está delimitada por el contorno de levantamiento con GPS y con dos zonas con vegetación. En las zonas con vegetación, la medida puede no ser fiable debido a las variaciones que pueden tener la dispersión tanto por el crecimiento como por la dispersión volumétrica que se produce en la vegetación.

Para hacer el análisis de la deformación sufrida en el terreno vamos a estudiar el acumulado trimestral, es decir, tomaremos los meses de Agosto y Octubre de 2016 y Enero, Abril y Julio de 2017.

En las siguientes figuras se representan los mapas de desplazamientos acumulados en los meses citados.

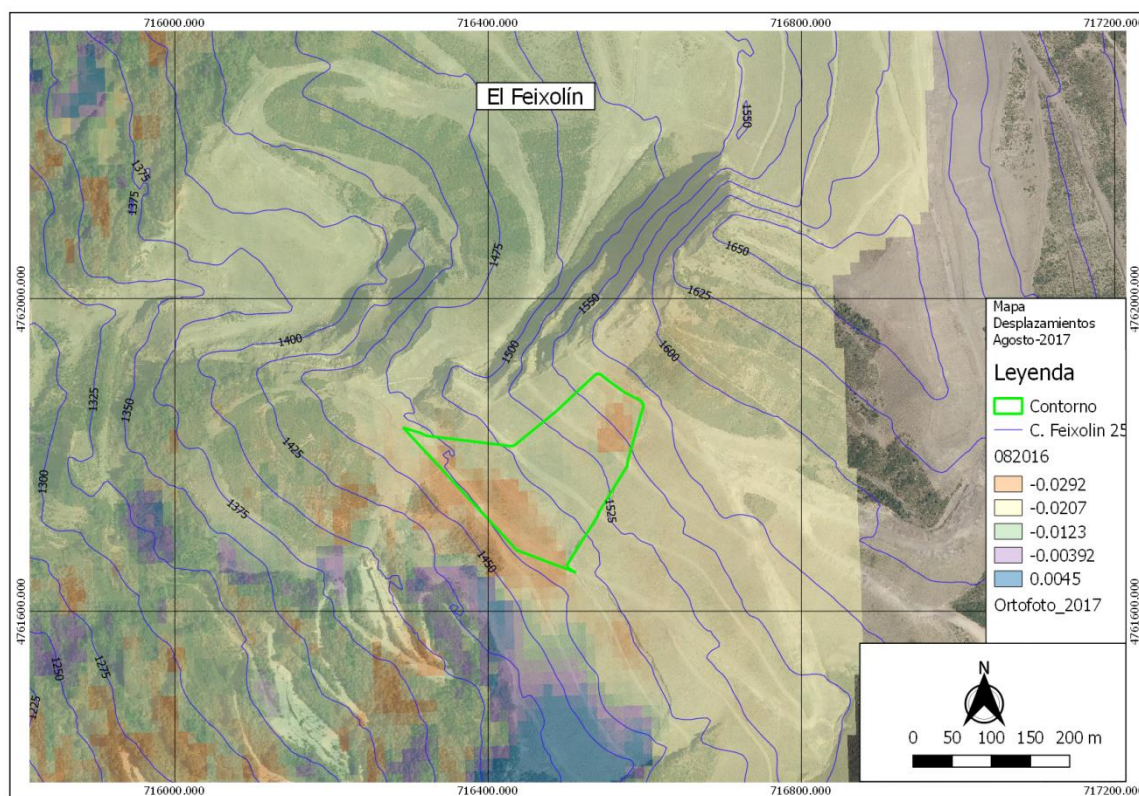


Figura 52: Desplazamiento acumulado Agosto 2016

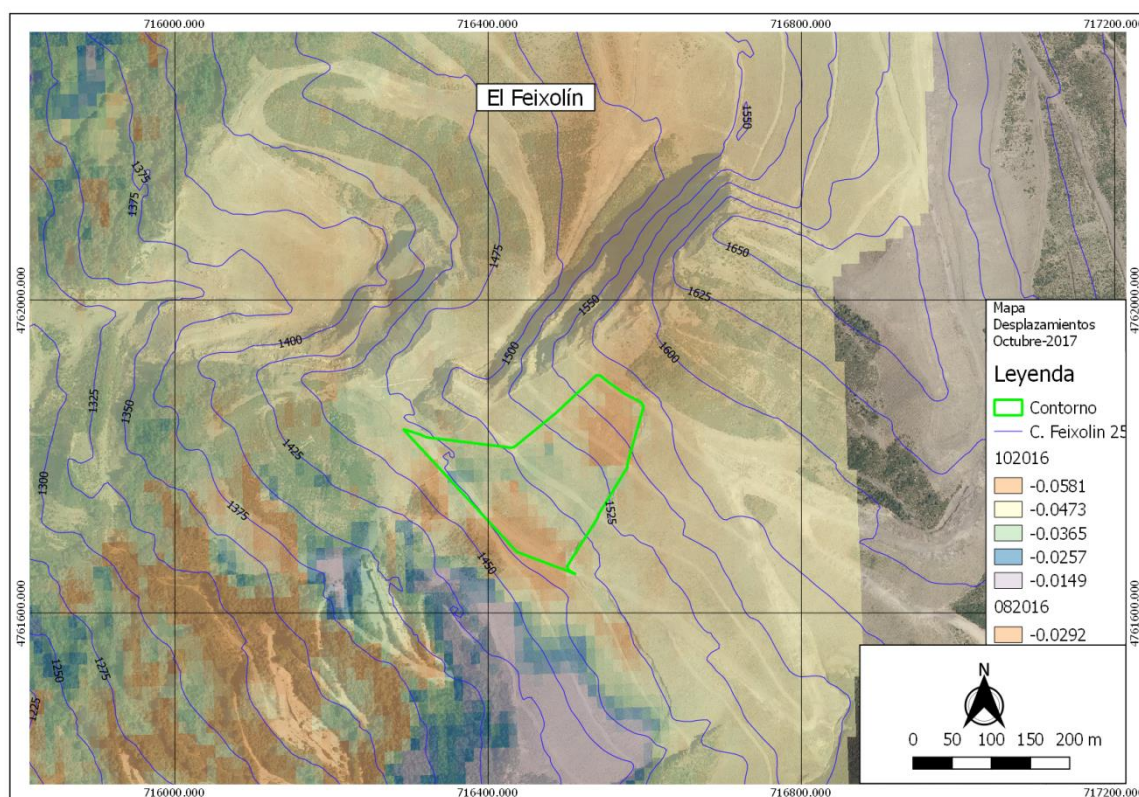


Figura 53: Desplazamiento acumulado Octubre 2016

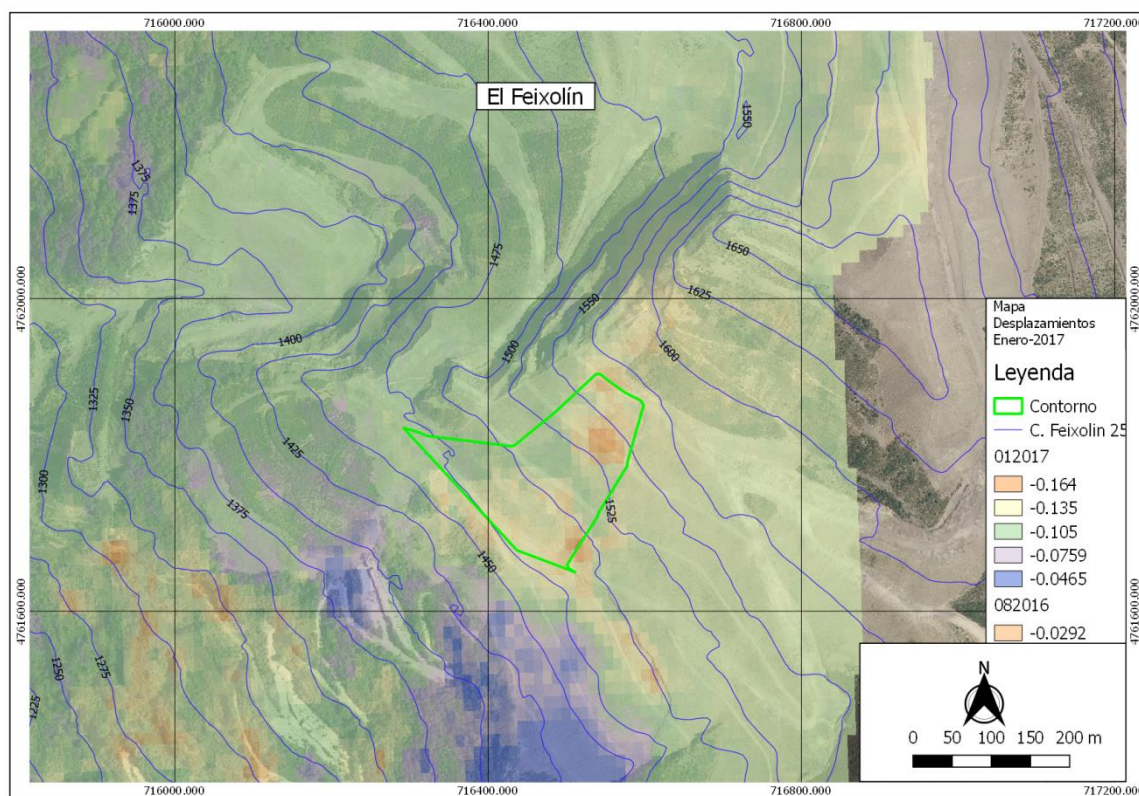


Figura 54: Desplazamiento acumulado Enero 2017

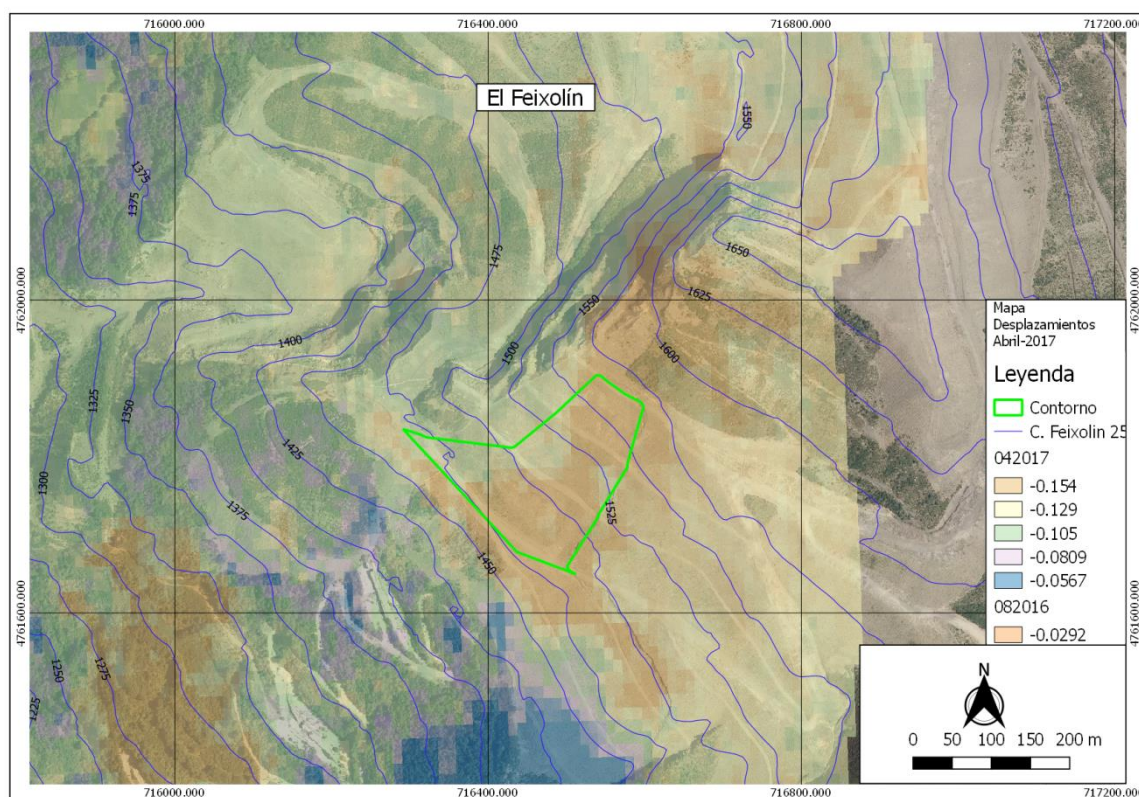


Figura 55: Desplazamiento acumulado Abril 2017

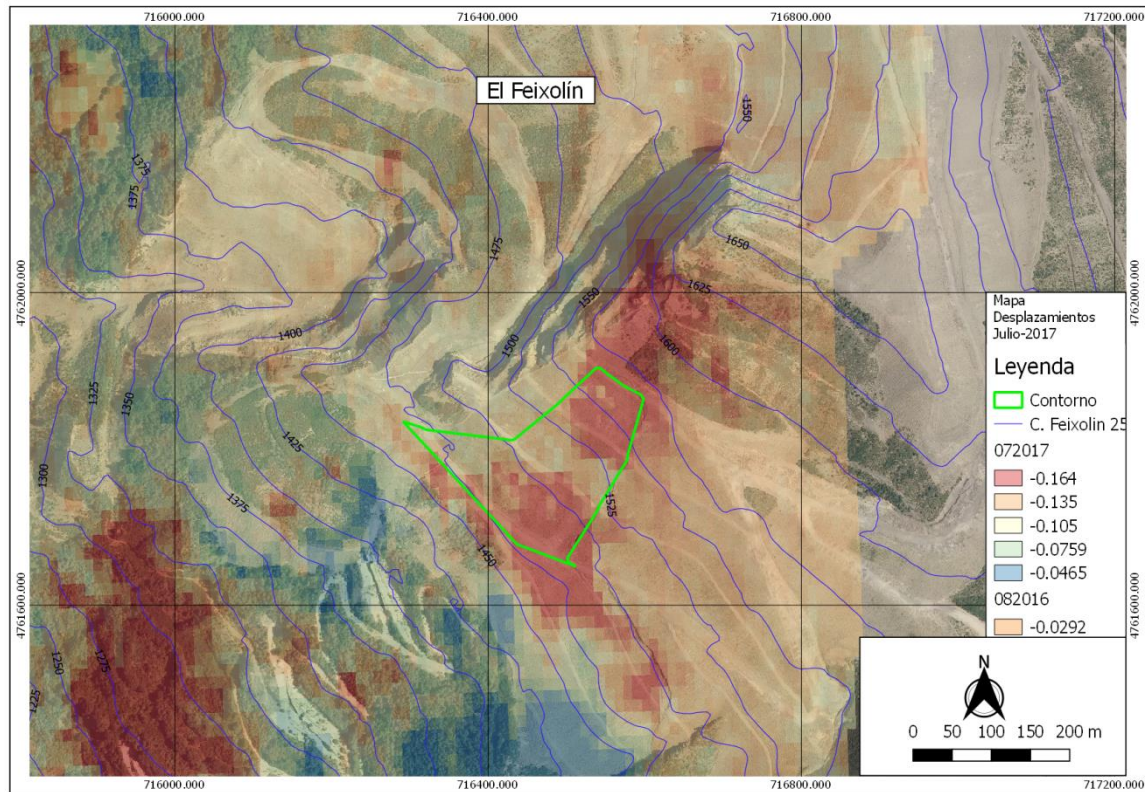


Figura 56: Desplazamiento acumulado Julio 2017

En la figura siguiente vemos el perfil en orientación Norte-Sur en la zona de subsidencia.

En el perfil se representan los desplazamientos acumulados, en la ventana gráfica podemos observar cómo ha evolucionado el hundimiento, siendo en el período de octubre a enero cuando mayor deformación se ha producido y alcanzando un valor máximo de 0,21 m.

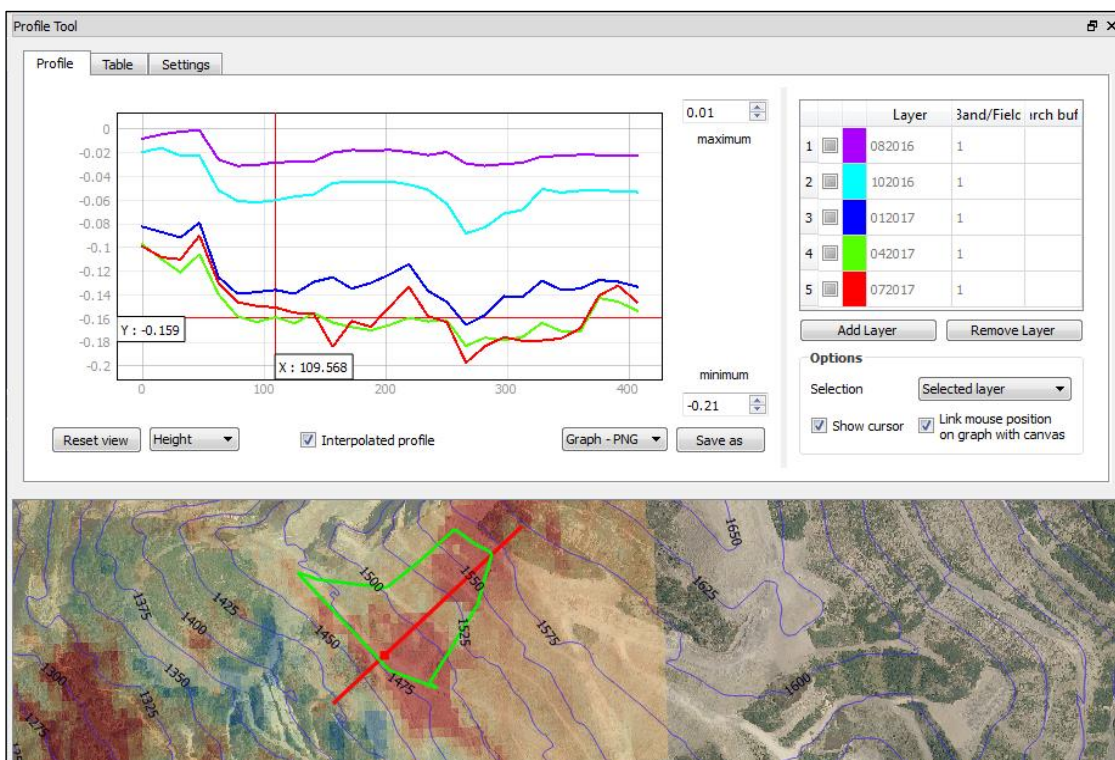


Figura 57: Perfil longitudinal Norte - Sur

En el perfil Oeste-Este también se observa la deformación sufrida y su evolución, el valor máximo en este perfil es de 0,20 m.

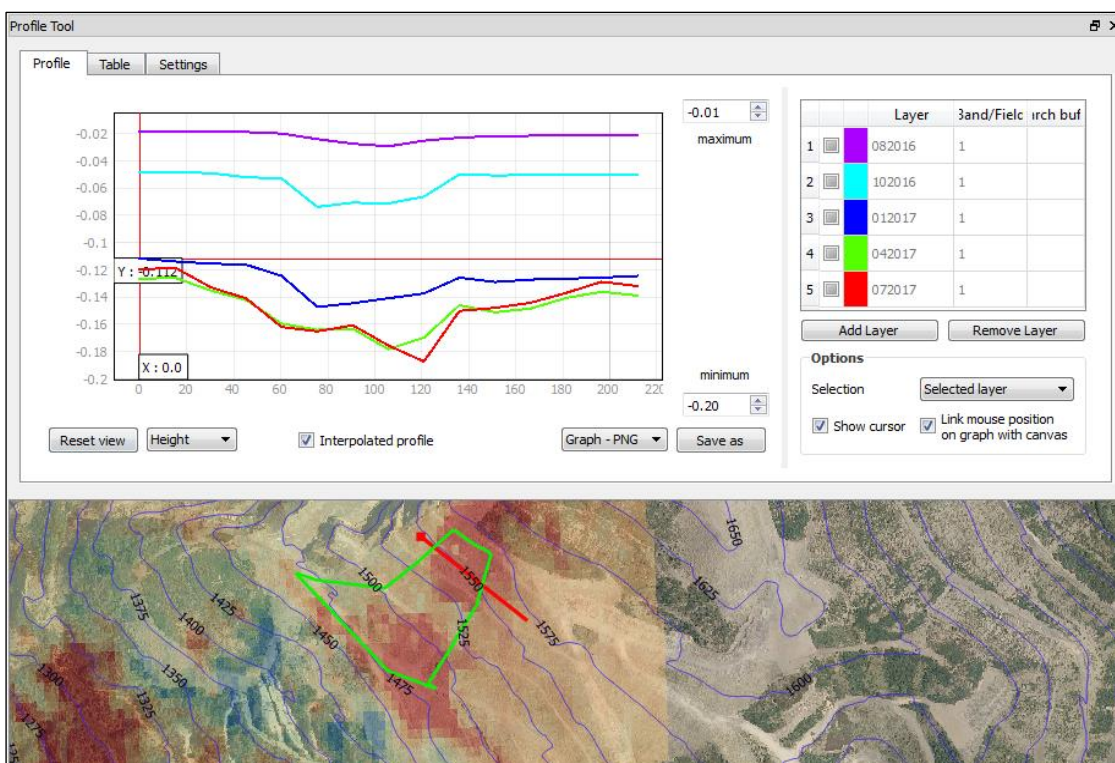


Figura 58: Perfil longitudinal Este - Oeste.

4.2. Desplazamiento medido con GPS

En las siguientes gráficas se visualiza la deformación sufrida por el terreno en el periodo de control.

Las mediciones se han realizado en una serie de puntos en la cabeza del hundimiento, es decir en los puntos que no han sufrido deformación, y otra serie de puntos en el pie del talud del hundimiento.

Las mediciones se han realizado en agosto de 2016 y en julio de 2017, comprobando de esta forma el hundimiento sufrido en esa zona del terreno entre las fechas indicadas.

En la Figura 59 se muestra la situación de los puntos levantados con GPS.

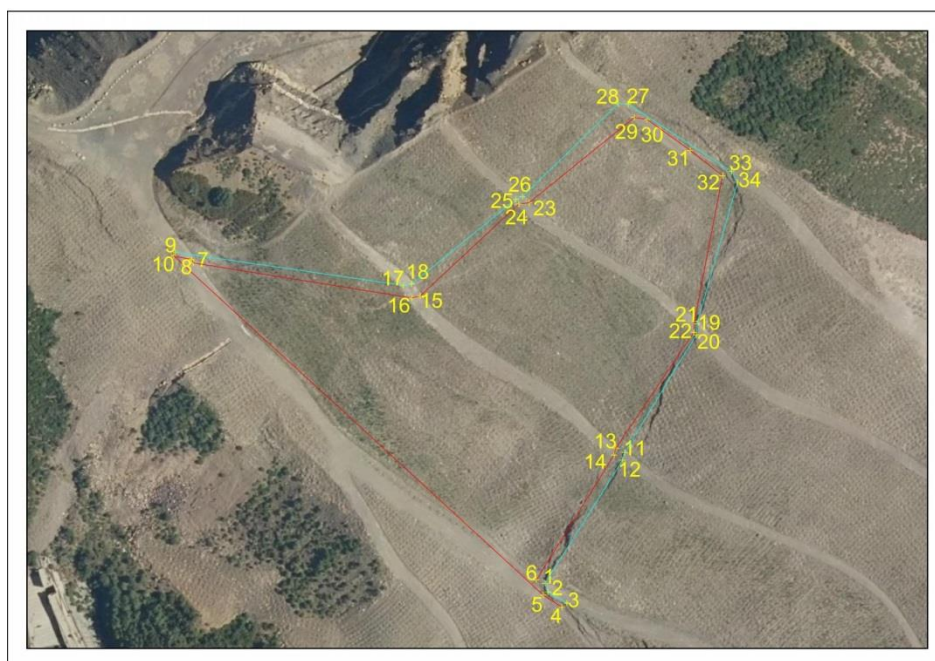


Figura 59: Localización puntos de levantamiento.

En las gráficas 60 y 61 se muestran las gráficas con las cotas y los desplazamientos en los puntos levantados en la cabeza del talud del hundimiento.



Figura 60: Cotas en puntos en cabeza de hundimiento.



Figura 61: Desplazamiento en puntos en cabeza de hundimiento.

En las gráficas 62 y 63 se muestran las gráficas con las cotas y los desplazamientos en los puntos levantados en el pie del talud del hundimiento.

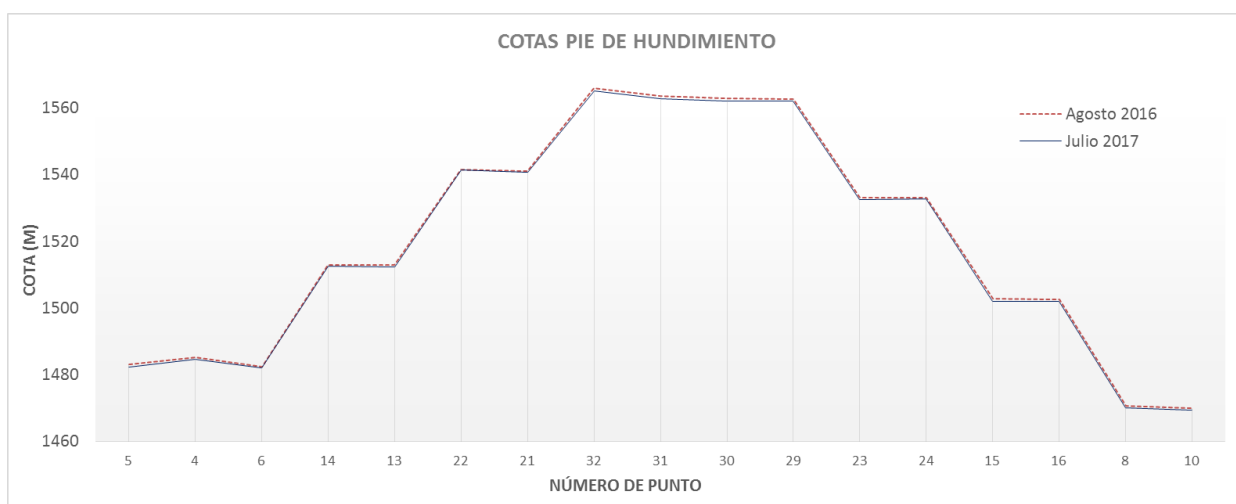


Figura 62: Cotas en puntos en pie de hundimiento.



Figura 63: Desplazamiento en puntos en pie de hundimiento.

4.3. Comparación de resultados

Una vez obtenidas las mediciones por los dos medios propuestos, podemos observar las diferencias existentes en los desplazamientos del terreno medidos.

Las mediciones con GPS están realizadas midiendo la cabeza y el pie del talud de la zona que se ha hundido, como observar en la gráfica de los desplazamientos del pie de talud de 0,70 y 0,80 m.

En las deformaciones detectadas con las mediciones realizadas con SAR el máximo desplazamiento es del orden de 0,20 m.



Como se puede ver la medición no ha sido muy exacta, en cambio, si que se detecta muy bien la subsidencia del terreno. En cuanto a la precisión podría mejorarse procesando imágenes en órbita ascendente y descendente, sin llegar a emplear las técnicas de SBAS o PS, que según los estudios que existen, obtienen muy buenos resultados pero exigen grandes recursos en equipo y en tiempo de procesado.



5. ESTUDIO DE COSTES

En este apartado se hará una estimación de los costes para realizar el control de la deformación del terreno.

5.1. Coste del seguimiento con medidas GPS

Se realizan dos mediciones una al principio de la campaña y otra al final, vamos a considerar el control en un plazo de 12 meses.

La medición se realiza con un equipo GPS con capacidad para realizar mediciones en tiempo real (RTK) con recepción de correcciones diferenciales vía Internet.

Para la realización de una medición de control se necesitan los siguientes recursos de equipo y mano de obra:

- 1 Equipo GPS RTK
- 1 Vehículo todoterreno
- 1 Titulado medio
- 1 Estación de trabajo con software

En el tiempo considerado para el titulado medio se considera el desplazamiento hasta la zona, el trabajo de levantamiento de los puntos y el tratamiento de los datos para su presentación.

Con estos datos el presupuesto resultante sería:

PRESUPUESTO CONTROL DE DEFORMACIÓN CON GPS					
Código	Concepto	Ud	Rendimiento	Precio unitario	Precio
EM01	Equipo GPS	d	2.00	100 €/d	€ 200.00
VTT01	Vehículo todoterreno	d	2.00	25 €/d	€ 50.00
MOB02	Titulado medio	h	20.00	35 €/h	€ 700.00
ETS01	Estación de trabajo con software	h	4.00	1,25 €/h	€ 5.00
TOTAL					€ 955.00
Gastos Generales (13%):					€ 124.15
Beneficio Industrial (6%):					€ 57.30
TOTAL CON BI Y GG:					€ 1 136.45



5.2. Coste del seguimiento con técnica DinSAR

Considerando un periodo de control de 12 meses, para el control de la deformación hemos de descargar una imagen inicial, más una imagen por cada mes para paliar en lo posible la decorrelación temporal, por lo tanto, consideramos el tiempo de trabajo necesario para la descarga de las imágenes y la presentación de resultados.

Para la realización del trabajo se necesitan los siguientes recursos:

- 1 Titulado superior o máster
- 1 Estación de trabajo con software

Con estos datos el presupuesto resultante sería:

PRESUPUESTO CONTROL DE DEFORMACIÓN CON IMÁGENES SAR						
<i>Código</i>	<i>Concepto</i>	<i>Ud</i>	<i>Rendimiento</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Precio</i>	
MOB01	Titulado Superior o Máster	h	15.00	45 €/h	€	675.00
ETS01	Estación de trabajo con software	h	15.00	1,25 €/h	€	18.75
TOTAL					€	693.75
Gastos Generales (13%):					€	90.19
Beneficio Industrial (6%):					€	41.63
TOTAL CON BI Y GG:					€	825.56



6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado el procesamiento de imágenes del sistema espacial Sentinel-1 que dispone de sistema de RADAR SAR en banda C. Este sistema de satélites pertenece al programa Copérnico de la ESA.

La ESA pone a disposición de los profesionales y usuarios tanto las imágenes SAR, formadas con los datos tomados por los satélites, como el software apropiado para el tratamiento de estas imágenes.

Los dos tipos de datos más frecuentes que se obtienen son: mapas de deformaciones del terreno y generación de Modelos Digitales de Elevación.

Existen muchos estudios y trabajos desde el año 1989, en el que Gabriel et al publicaron el primer trabajo aplicando la técnica DinSAR. La tecnología DinSAR, se desarrolló a partir de la InSAR para disminuir el error que se producía en la fase debido a la topografía de la zona de estudio, permitiendo además medir deformaciones incluso subcentimétricas. Para lograr estas precisiones subcentimétricas además de la técnica DinSAR, es necesario emplear otras técnicas como Small Base Line DinSAR (SBAS), Permanent Scatterers (PS), o puntos dispersores y emplear más de 20 o 30 interferogramas, lo que exige el empleo de muchos recursos, tanto en tiempo como en equipo informático.

El presente trabajo se ha desarrollado para realizar una constatación y seguimiento de una subsidencia o hundimiento que se produce en una ladera de una explotación minera de interior y a cielo abierto, que se encuentra inactiva y se han realizado trabajos de restauración del medio ambiente.

La técnica DinSAR elegida permitiría realizar las mediciones de la deformación del terreno con una precisión de centímetros.

La revisión de los objetivos marcados es la siguiente:



- Aplicación técnica DinSAR. Se ha conseguido medir el desplazamiento en la zona de estudio. Además se han realizado varios procesamientos con las imágenes para obtener los mejores resultados.
-
- Estructura y adquisición de datos SAR. Se ha conseguido no solamente la descarga de las imágenes SAR y su estructura de datos, sino que además se han descargado también de la página de <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/> en la que además se puede comprobar antes de descargar las imágenes la línea base perpendicular, la coherencia estimada y la altura de ambigüedad, para así poder elegir las más adecuadas al trabajo a realizar. También se ha revisado y entendido los datos que va generando el programa.
-
- Familiarización con el programa. En el desarrollo del presente trabajo se ha conseguido explorar y dominar los procesos para obtener el desplazamiento, aunque hay que decir que el programa tiene muchísimas funcionalidades y posibilidades de configuración de `procesamiento con lo que no se han evaluado todas las posibilidades que ofrece.
-
- Establecimiento de metodología para el procesamiento. Se describe el paso a paso del procesamiento de las imágenes, mostrando las ventanas de configuración.
-
- Control y seguimiento. Sí que se verifica claramente que la zona ha sufrido hundimiento, aunque el movimiento reflejado mediante el proceso DinSAR es menor que el que se ha producido realmente.
-
- Valor cuantitativo medición con GPS. Se presentan las gráficas de las mediciones de la deformación con GPS con correcciones diferenciales por Internet.
-



- Estimación de costes. Se realiza el presupuesto necesario para realizar las mediciones con GPS y presupuesto del procesado de las imágenes para obtener el valor del desplazamiento sufrido por el terreno.

Tras haber realizado el desarrollo del presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La técnica DinSAR es válida para detectar deformaciones en el terreno.
- Si que evidencia la existencia de deformación aunque no detecta la verdadera dimensión del hundimiento, esto puede ser debido a que la zona de estudio es pequeña, ya que la resolución del SAR es de 20 m en alcance y 4 m en la dirección de azimut.
- A la vista de las deformaciones detectadas parece que se trata de una subsidencia del terreno más que de un deslizamiento de la ladera.
- Con el estudio de la zona con la técnica DinSAR se obtiene información de una zona más amplia que con las medidas de GPS, y en zonas de difícil acceso.

Como inconvenientes, se puede decir que:

- Los resultados no siempre son fáciles de interpretar.
- Para obtener precisión en la medida se necesita que se den condiciones favorables en cuanto a la superficie de estudio, distancia temporal de las imágenes condiciones atmosféricas, etc.

6.2. Nuevas líneas de investigación y mejoras

Aunque hay muchos estudios exponiendo los resultados obtenidos en las medidas de las deformaciones del terreno provocadas por volcanes, terremotos o por la disminución de acuíferos y de obtención de Modelos Digitales de Elevación, no existe mucha información detallada de los procesos a seguir.



El programa SNAP tiene muchas funcionalidades y opciones de configuración para la ejecución de los procesos, pero se encuentra poca información al respecto con lo que tendríamos que ampliar la información para utilizarlos apropiadamente.

En mi opinión las imágenes de satélite pueden tener mucha aplicación y no solamente en el estudio de las deformaciones de la Tierra, sino también en el estudio y seguimiento de los cultivos.

Los datos obtenidos por los satélites y sus posibilidades, creo que son poco conocidos, quizá por no tener respaldo comercial, por lo que es conveniente darlo a conocer y que sea utilizado cada vez por más profesionales.

Y por último una mejora importante sería integrar el proceso de desenvolvimiento de la fase, mediante el algoritmo SNAPHU, dentro del programa SNAP.



7. BIBLIOGRAFÍA

- H. A. Zebker and R. M. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric SAR observations," J. Geophys. Res., vol. 91, pp.4993–4999, 1986.
- Rosen, Paul & Hensley, Scott & Joughin, I.R. & Li, F.K. & Madsen, Soren & Rodriguez, Ernesto & Goldstein, R.M. (2000). "Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceedings of the IEEE" 88. 333 - 382. 10.1109/5.838084.
- ASF. "Alaska Satellite Facility." Servicio de Facilidades de Alaska, Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska Fairbanks Retrieved Mayo 2011, from <http://www.asf.alaska.edu/>.
- CCRS. (2001). "Programa GlobeSAR: Material educativo para teledetección mediante radares" Canada Centre for Remote Sensing CCRS, Natural Resources Canada, from <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/internat/glbsar2/indexe.html>.
- T. Strozzi, U. Wegmuller, C. L. Werner, A. Wiesmann and V. Spreckels, "JERS SAR interferometry for land subsidence monitoring" in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 41, no. 7, pp. 1702-1708, July 2003. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1221839&isnumber=27443>
- Crosetto, M & Crippa, B & Biescas, Erlinda & Monserrat, O & Agudo, Marta & P, Fernández. (2005). "Land deformation monitoring using SAR interferometry: State-of-the-art". Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation. 6. 497-510.
- David Sandwell, Rob Mellors† Xiaopeng Tong, Xiaohua Xu, Matt Wei, Paul Wessel (2016). An InSAR Processing System. Based on Generic Mapping Tools
- ESA. ASAR Product HandBook, 2000-2007
- InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes from Space.
- ARSET. Applied Remote Sensing Training. <http://arset.gsfc.nasa.gov>
- SAR Interferométrico para el Estudio de Terremotos
Eric Jameson Fielding, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology



- SENTINEL-1 Toolbox. SAR Basics Tutorial.
Copyright © 2015 Array Systems Computing Inc. <http://www.array.ca/>
<http://step.esa.int>
- Surface subsidence monitoring with NEST. Tutorial – SAR Interferometry
Dr.-Ing. Diana Walter. Institute of Geotechnical Engineering and Mine
Surveying, TU Clausthal
- Alaska SAR Facility. Scientific SAR User's Guide
Coert Olmsted, Senior Programmer/Analyst. July 1993
- Generación de un Interferograma. Deformación por un Terremoto
Erika Podest
- Medidas de deformación del terreno a vista de satélite
Oscar Mora, Vicenç Palà, Roman Arbiol, Albert Adell y Marga Torre
<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses>
- InSAR Principles:
Guidelines for SAR Interferometry
Processing and Interpretation
https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf
https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptB.pdf
<http://www.sarmap.ch/pdf/SAR-Guidebook.pdf>
- Spaceborne Differential SAR Interferometry: Data Analysis Tools for
Deformation Measurement
Michele Crosetto 1,*, Oriol Monserrat 1, María Cuevas 1 and Bruno Crippa 2
- TOPS Interferometry Tutorial. Issued May 2015. Updated August 2016
Luis Veci. Copyright © 2015 Array Systems Computing Inc.
<http://www.array.ca/>
<http://step.esa.int>